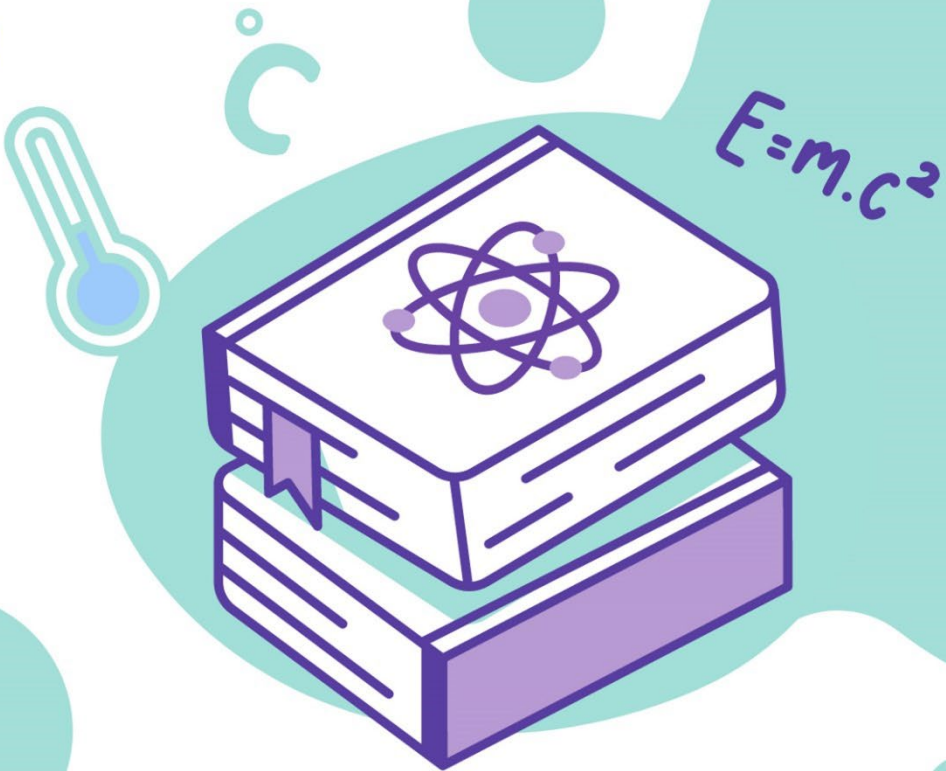


FISIKA DASAR 2

Editor: Suci Haryanti



I Putu Tedy Indrayana | Minarti | Kristina Uskenat
Gusti Ayu Rai Tirta | Hebat Shidow Falah | Samsul Arifin
Muh. Said L | Jan Setiawan | Nurul Fuadi | Ety Kurniati
Kurniati Abidin | Sudirman | Mawarni Saputri
A. Jusriana | Irnin Agustina Dwi Astuti
Ayu Candra Dewi Wesnawati | Rafika Sari

BUNGA RAMPAI

FISIKA DASAR 2

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

FISIKA DASAR 2

I Putu Tedy Indrayana
Minarti
Kristina Uskenat
Gusti Ayu Rai Tirta
Hebat Shidow Falah
Samsul Arifin
Muh. Said L
Jan Setiawan
Nurul Fuadi
Ety Kurniati
Kurniati Abidin
Sudirman
Mawarni Saputri
A. Jusriana
Irnin Agustina Dwi Astuti
Ayu Candra Dewi Wesnawati
Rafika Sari

Penerbit



CV. MEDIA SAINS INDONESIA
Melong Asih Regency B40 - Cijerah
Kota Bandung - Jawa Barat
www.medsan.co.id

Anggota IKAPI
No. 370/JBA/2020

FISIKA DASAR 2

I Putu Tedy Indrayana
Minarti
Kristina Uskenat
Gusti Ayu Rai Tirta
Hebat Shidow Falah
Samsul Arifin
Muh. Said L
Jan Setiawan
Nurul Fuadi
Ety Kurniati
Kurniati Abidin
Sudirman
Mawarni Saputri
A. Jusriana
Irnin Agustina Dwi Astuti
Ayu Candra Dewi Wesnawati
Rafika Sari

Editor:
Suci Haryanti

Tata Letak:
Mega Restiana Zendrato

Desain Cover:
Manda Aprikasari

Ukuran:
A5 Unesco: 15,5 x 23 cm

Halaman:
viii, 312

ISBN:
978-623-195-441-1

Terbit Pada:
Juli 2023

Hak Cipta 2023 @ Media Sains Indonesia dan Penulis

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit atau Penulis.

PENERBIT MEDIA SAINS INDONESIA
(CV. MEDIA SAINS INDONESIA)
Melong Asih Regency B40 - Cijerah
Kota Bandung - Jawa Barat
www.medsan.co.id

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga buku kolaborasi dalam bentuk buku dapat dipublikasikan dan dapat sampai di hadapan pembaca. Buku ini disusun oleh sejumlah guru, dosen dan praktisi sesuai dengan kepakarannya masing-masing. Buku ini diharapkan dapat hadir memberi kontribusi positif dalam ilmu pengetahuan khususnya terkait dengan Pembelajaran Berbasis: Fisika Dasar 2.

Sistematika buku ini dengan judul “Fisika Dasar 2” terdiri atas 17 bab yang dijelaskan secara rinci dalam pembahasan mengenai konsep dan strategi dan analisis diantaranya: Olisasi, Gelombang Berjalan, Gelombang Bunyi, Muatan dan Medan Listrik, Hukum Gauss, Potensial Listrik, Kapasitansi, Arus Listrik dan Resistansi, Rangkaian Listrik Searah, Medan Magnetik, Gaya Magnetik, Induksi Magnetik, Rangkaian Listrik Bolak-Balik, Persamaan Maxwell dan Gelombang Elektromagnetik, Cahaya, Optika Geometri dan Fisis.

Akhirnya kami mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak yang telah mendukung dalam proses penyusunan dan penerbitan buku ini, secara khusus kepada Penerbit Media Sains Indonesia sebagai inisiator. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca sekalian.

Juli, 2023

Editor

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
1 OSILASI	1
Pendahuluan	1
Gerak Harmonik Sederhana	3
Energi Pada Gerak Harmonik Sederhana.....	11
Osilator Harmonik Sederhana	13
Pendulum	17
Osilasi Tereadam	22
Osilasi Paksa dan Resonansi	27
2 GELOMBANG BERJALAN.....	33
Gerak Gelombang Sederhana.....	34
Gelombang Transversal	35
Gelombang Longitudinal	36
Gelombang Periodik	37
Laju Gelombang.....	38
Persamaan Umum Gelombang.....	41
Energi dan Daya Gelombang	46
Interferensi dan Superposisi Gelombang	48
Gelombang Berdiri dan Resonansi.....	51
3 GELOMBANG BUNYI	57
Gerak Gelombang Bunyi	57
Laju Gelombang Bunyi.....	59
Energi Gelombang Bunyi.....	59
Interferensi Gelombang Bunyi.....	60

	Intensitas Dan Taraf Intensitas Gelombang Bunyi	60
	Pipa Organa.....	63
	Layangan Bunyi	65
	Efek Doppler	65
4	MUATAN DAN MEDAN LISTRIK.....	69
	Pendahuluan.....	69
	Muatan Listrik.....	73
	Hukum Coulomb.....	78
	Medan Listrik Oleh Partikel Bermuatan	84
	Medan Listrik Oleh Dipole	89
	Medan Listrik Oleh Benda Rigid Bermuatan.....	91
	Muatan Titik Dalam Medan Listrik	95
	Dipole Dalam Medan Listrik	97
5	HUKUM GAUSS	103
	Fluks Listrik	103
	Hukum Gauss.....	107
	Aplikasi Hukum Gauss	109
6	POTENSIAL LISTRIK.....	117
	Beda Potensial Listrik	117
	Permukaan Ekuipotensial dan Medan Listrik	120
	Potensial Listrik oleh Partikel Bermuatan.....	122
	Potensial listrik oleh Dipole	123
	Potensial Listrik oleh Muatan Terdistribusi Kontinu.....	125
	Energi Potensial Listrik dari Sistem Partikel Bermuatan.....	125
	Potensial Listrik oleh Konduktor Bermuatan.....	126

7	KAPASITANSI	131
	Kapasitansi dari Kapasitor	135
	Kapasitansi Kapasitor Pelat Sejajar	136
	Kapasitansi Kapasitor Silinder	138
	Kapasitansi Kapasitor Sferis.....	141
	Rangkaian Kapasitor	142
	Energi Listrik yang Tersimpan Dalam Kapasitor	145
8	ARUS LISTRIK DAN RESISTANSI	151
	Arus Listrik	151
	Rapat Arus Listrik.....	152
	Resistansi, Resistivitas, dan Resistor	153
	Hukum Ohm.....	155
	Rangkaian Resistor	157
	Rangkaian Seri	161
	Rangkaian Paralel	162
	Rangkaian Kombinasi	163
9	RANGKAIAN LISTRIK SEARAH	169
	Sumber tegangan listrik searah	169
	Arus Listrik	170
	Usaha, Energi dan GGL Induksi	171
	Daya Listrik.....	176
	Rangkaian Listrik Searah	177
	Hukum Kirchhoff.....	179
	Rangkaian RC	181
10	MEDAN MAGNETIK.....	185
	Definisi Medan Magnetik	185
	Garis-garis Medan Magnetik.....	186

	Medan Magnetik oleh Partikel bermuatan	187
	Percobaan Oersted.....	188
	Hukum Biot – Savart.....	190
	Hukum Biot – Savart.....	191
	Medan Magnetik Oleh Kawat Melingkar Berarus Listrik	191
	Medan Magnetik Oleh Solenoida.....	192
	10.9 Medan Magnetik Oleh Toroida.....	193
	Fluks Magnetik dan Hukum Gauss	194
	Hukum Ampere.....	195
11	GAYA MAGNETIK.....	197
	Gaya Magnetik pada Muatan yang Bergerak.....	198
	Efek Hall	200
	Gaya Magnetik pada Kawat Berarus Listrik.....	202
	Gaya dan Torsi Magnetik pada Loop Berarus Listrik.....	203
	Momen dipol Magnetik.....	204
	Magnetisasi dan Suseptibilitas Magnetik.....	205
12	INDUKSI ELEKTROMAGNETIK.....	211
	Pendahuluan.....	211
	Induksi Elektromagnetik	212
	Gaya Gerak Listrik Induksi.....	212
	<i>Hukum Lenz</i>	214
	Induktor.....	214
	Induktor Ruhmkorff.....	218
	Aplikasi Induksi Elektromagnetik.....	219
13	RANGKAIAN LISTRIK BOLAK BALIK	231
	Arus Bolak-balik.....	231
	Tegangan Bolak-Balik	232

	Fasor dan Diagram Fasor	234
	Rangkaian Lc Dan Rangkaian Rlc	237
14	PERSAMAAN MAXWELL DAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK.....	247
	Arus Pergeseran Maxwell	247
	Persamaan Maxwell	248
	Persamaan Gelombang Untuk Elektromagnetik	249
	Gelombang Bidang dan Kecepatan Cahaya	250
	Gelombang Sinusoidal	251
	Gelombang Elektronik Melalui Materi	252
	Gelombang Elektromagnetik Tegak	252
	Energi dan Momentum Gelombang Elektromagnetik	254
	Radiasi Elektromagnetik	255
15	CAHAYA.....	259
	Pengertian Cahaya.....	259
	Berbagai Perhitungan Untuk Kelajuan Cahaya.....	265
	Sifat-Sifat Cahaya	268
16	OPTIKA GEOMETRI	275
	Cermin.....	275
	Pemantulan oleh Cermin Datar	275
	Pencerminan oleh Cermin Lengkung.....	277
	Lensa	281
	Pembiasan Cahaya	285
	Alat Optik.....	286
17	OPTIKA FISIS.....	297
	Interferensi Cahaya	297
	Eksperimen Young.....	299
	Interferensi oleh Celah Ganda.....	300

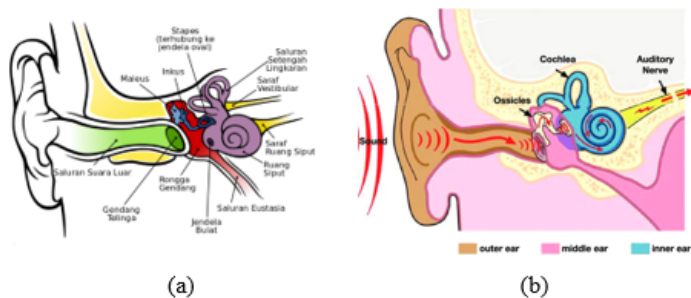
Interferensi oleh Lapisan Tipis.....	301
Difraksi Cahaya.....	303
Dispersi Cahaya	309
Polarisasi Cahaya	309

I Putu Tedy Indrayana

Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Udayana, Bali – Indonesia

Pendahuluan

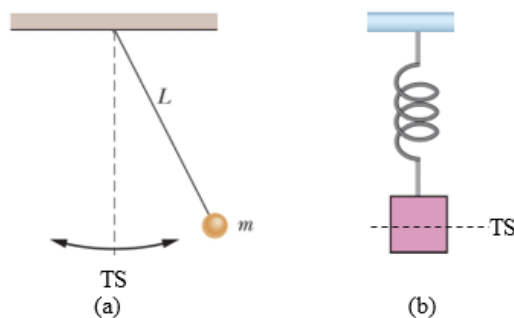
Dalam kehidupan sehari-hari kita sering berjumpa dengan berbagai fenomena yang memperlihatkan gerakan periodik (*periodic motion*), seperti getaran senar gitar saat dipetik, getaran senar biola saat digesek, getaran permukaan sisi kendang saat dipukul, getaran permukaan luar speaker saat musik diputar dengan volume tertentu, getaran pegas sepeda motor (*soft-breaker*) saat melintasi jalan berlubang, gerakan seorang atlet trampolin, ayunan bandul jam dinding, ayunan anak-anak TK di taman bermain, serta gerakan kabel listrik yang terhubung melalui dua tiang saat dihempas angin. Selain itu, gerak periodik juga dapat dirasakan ketika terjadi gempa. Bangunan-bangunan akan mengalami gerak periodik akibat guncangan gempa. Hal yang sama juga terjadi pada jembatan gantung yang dihempas angin berkekuatan besar. Jembatan akan mengalami gerakan periodik dengan periode tertentu. Gerak periodik juga terjadi dalam tubuh manusia, misalnya getaran gendang telinga ketika menerima rangsangan bunyi sehingga kita mampu mendengar bunyi dari lingkungan (Gambar 1.1). Selain itu, jantung juga mengalami gerakan periodik untuk memompa darah sehingga beredar ke seluruh bagian tubuh.



Gambar 1.1 Anatomi indra pendengaran (a) dan proses mendengar bunyi (b).

Secara mikroskopik, gerak periodik juga dialami oleh molekul-molekul bahkan atom-atom penyusun benda. Gerak periodik yang dialami atom-atom tersebut akan semakin kuat ketika temperatur benda meningkat. Contohnya, ketika sebuah lempeng tembaga dipanaskan, maka gerakan periodik atom-atom tembaga akan semakin kuat. Begitu pula saat ujung-ujung kawat tembaga diberikan beda potensial listrik yang semakin besar, maka atom-atom tembaga akan bergerak periodik semakin kuat. Dengan demikian, pemahaman tentang gerak periodik menjadi penting agar kita mampu menjelaskan secara fisis berbagai fenomena dalam kehidupan sehari-hari.

Secara fisis, gerak periodik didefinisikan sebagai gerak yang berulang pada selang waktu yang tetap. Ciri-ciri gerak periodik, yaitu: 1) memiliki periode waktu untuk gerakan berulang, 2) tidak memiliki posisi kesetimbangan – TS (*equilibrium position*), dan 3) tidak mengalami gaya pemulih (*restoring force*). Seperti halnya gerakan bandul, gerakannya selalu berulang setiap periode waktu tertentu di sekitar titik kesetimbangannya (Gambar 1.2a). Begitu pula dengan pegas yang digantungi massa pada salah satu ujungnya, maka gerakan massa akan selalu berulang secara periodik (Gambar 1.2b). Secara khusus, gerak periodik seperti contoh tersebut diistilahkan dengan **osilasi** (*oscillation*). Dalam beberapa kasus, gerak periodik juga diistilahkan sebagai getaran / **vibrasi** (*vibration*). Baik osilasi dan vibrasi adalah sama-sama menyatakan gerak periodik, memiliki posisi kesetimbangan dan gaya pemulih yang bekerja pada benda, tetapi osilasi lebih cenderung digunakan untuk menyatakan gerakan periodik benda-benda dengan simpangan cukup besar. Sementara vibrasi digunakan untuk menyatakan gerak periodik dengan simpangan yang sangat kecil, seperti vibrasi garpu tala, vibrasi pegas sepeda motor, vibrasi atom.



Gambar 1.2 Osilasi pendulum (a) dan vibrasi massa yang tergantung pada pegas (b).

Pada kenyataannya, berbagai fenomena yang kita jumpai terkait gerak periodik tidak benar-benar mengalami gerak periodik sempurna. Kondisi itu disebabkan oleh pengaruh gesekan udara atau fluida secara umum di sekitar benda yang bergerak periodik. Adanya fluida dapat memicu terjadinya redaman pada gerakan benda, sehingga benda mengalami gerak periodik teredam. Secara fisika, gerakan periodik benda selalu dapat direpresentasikan dengan fungsi periodik berupa fungsi sinus atau cosinus. Fungsi tersebut disebut fungsi harmonik, sehingga gerak benda dengan persamaan yang dinyatakan dengan fungsi harmonik disebut sebagai gerak harmonik. Osilasi maupun vibrasi juga merupakan gerak harmonik karena kedua gerakan tersebut dapat direpresentasikan dengan fungsi-fungsi harmonik sinus atau cosinus. Dengan demikian, dalam bab ini akan dibahas secara fisis tentang gerak harmonik. Gerakan benda yang terjadi secara harmonik tanpa disertai adanya redaman maka disebut sebagai gerak harmonik sederhana (*simple harmonic motion*). Terdapat dua jenis gerak harmonik sederhana, yaitu gerak harmonik sederhana linear (*linear simple harmonic motion*) dan gerak harmonik sederhana angular (*angular simple harmonic motion*).

Gerak Harmonik Sederhana

Perhatikan gerak sebuah partikel secara linear (Gambar 1.3). Dalam keadaan setimbang, partikel akan berada di titik 0. Titik ini adalah posisi dimana tidak ada resultan gaya-gaya yang bekerja pada partikel. Saat partikel diganggu, misalkan partikel disimpangkan ke kanan sejauh $+x_m$ maka keadaan partikel tidak lagi dalam keadaan stabil. Oleh karena itu, partikel selalu akan berusaha menuju ke posisi 0. Dalam kondisi ini, partikel akan mengalami gaya pemulih \vec{F}_r yang arahnya ke kiri menuju titik 0. Selain itu, pada titik awal simpangan di $+x_m$ partikel dijaga dalam keadaan diam, sehingga kecepatan mula-mula partikel adalah nol. Ketika partikel dilepaskan, maka akibat gaya pemulih partikel akan bergerak ke arah kiri dengan kecepatan \vec{v} (Gambar 1.4). Kecepatan partikel justru bernilai paling besar ketika partikel tepat melalui titik 0. Dengan demikian, partikel justru melewati titik 0 hingga ke titik $-x_m$. Pada saat di titik ini, partikel berhenti dan justru mengalami gaya pemulih maksimum ke arah kanan menuju titik 0 sehingga partikel kembali bergerak ke titik 0 dan akhirnya sampai ke titik $+x_m$ lagi. Total waktu yang diperlukan partikel untuk bergerak dari posisi awal sampai kembali ke posisi awal lagi adalah T sekon. Total waktu ini disebut periode gerak harmonik partikel. Oleh karena itu, partikel dapat mengalami sejumlah n gerak bolak-balik dalam selang waktu Δt

tertentu. Jumlah gerakan bolak-balik yang terjadi dalam satu satuan waktu (satu sekon) disebut dengan *frekuensi f* (hertz),

1 hertz = 1 Hz \equiv 1 gerakan bolak-balik dalam 1 sekon.

Secara matematis,

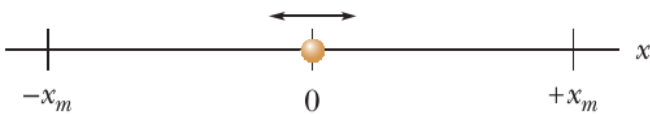
$$f = \frac{n}{\Delta t} \dots\dots\dots 1.1)$$

Jika periode T didefinisikan sebagai selang waktu yang diperlukan untuk satu kali gerakan bolak-balik, maka

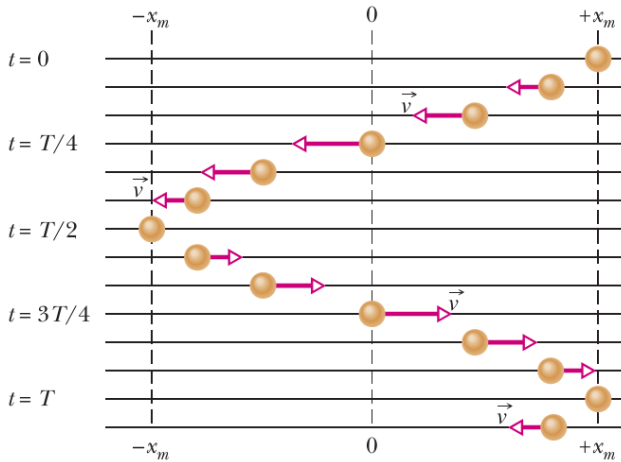
$$T = \frac{\Delta t}{n} \dots\dots\dots 1.2)$$

Persamaan 1.1 dan 1.2 memberikan hubungan antara f dan T , yaitu

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots 1.3)$$



Gambar 1.3 Partikel di titik kesetimbangan stabil (*stable equilibrium position*).

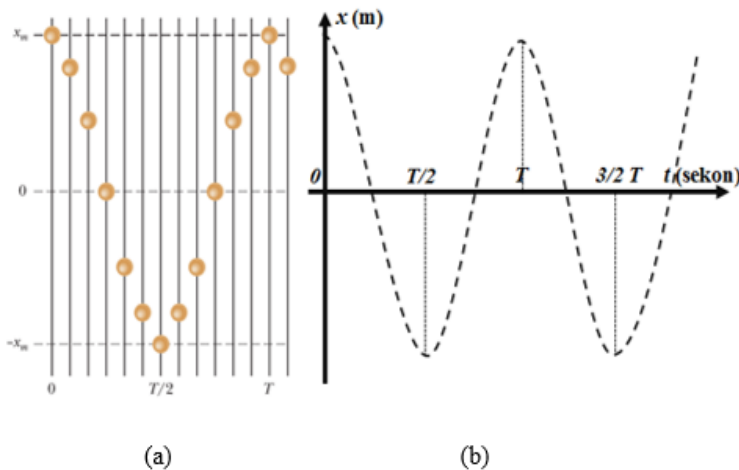


Gambar 1.4 Ilustrasi gerakan partikel secara harmonik dengan periode T .

Gerak partikel seperti diilustrasikan dengan Gambar 1.4 dapat dinyatakan sebagai gerakan harmonik sederhana apabila dipenuhi syarat-syarat berikut:

1. Partikel memiliki posisi kesetimbangan stabil (*stable equilibrium position*) dimana resultan gaya-gaya yang bekerja pada partikel pada posisi ini bernilai nol;
2. Partikel bergerak pada lintasan lurus (*straight line*);
3. Partikel mengalami gaya pemulih (*restoring force*) yang selalu berupaya memulihkan posisi partikel ke posisi kesetimbangan stabil ketika partikel mengalami penyimpangan (perpindahan). Arah gaya pemulih selalu berlawanan terhadap arah gerakan menyimpang partikel dari posisi kesetimbangan stabil; dan
4. Partikel tidak mengalami gesekan dengan bidang sentuh maupun fluida di sekitarnya sehingga tidak ada gaya eksternal yang menyebabkan redaman terhadap gerakan partikel. Gerakan partikel akan tetap lestari selamanya ($\Delta t = \infty$).

Berdasarkan Gambar 1.4, partikel dapat mengalami penyimpangan maksimum dari posisi 0 yaitu sebesar $+x_m$ ke kanan dan $-x_m$ ke kiri. Simpangan maksimum ini disebut sebagai **amplitudo**. Apabila Gambar 1.4 diputar sebesar 90° ke kiri, maka akan diperoleh Gambar 1.5a. Secara visual, titik-titik yang dilalui partikel selama bergerak membentuk kurva cosinus seperti ditampilkan oleh Gambar 1.5b.

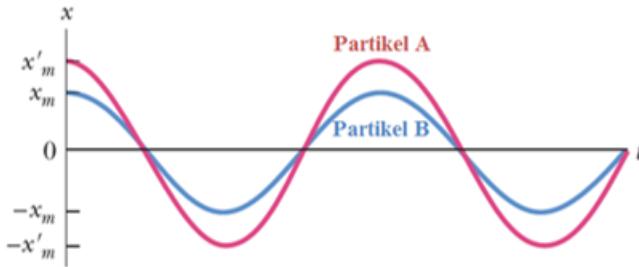


Gambar 1.5 Ilustrasi lintasan partikel (a) dan grafik cosinus lintasan partikel (b).

Simpangan (perpindahan) yang dialami partikel sebagai fungsi waktu t dapat diungkapkan secara matematis menggunakan persamaan cosinus,

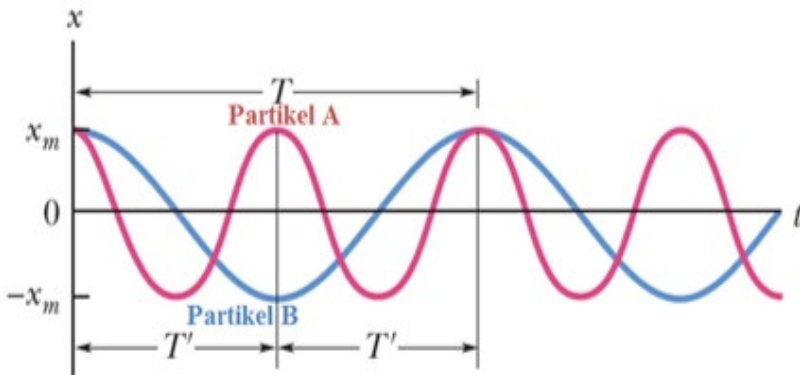
$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots 1.4)$$

dimana x_m , ω , dan φ masing-masing menyatakan amplitudo (meter), frekuensi angular (rad/s), dan sudut fasa partikel (radian). Apabila dua partikel identik memiliki amplitudo berbeda tetapi ω dan φ sama, maka simpangan kedua partikel saat $t \neq nT$ ($n = 1/2, 2/2, 3/2, 4/2, 5/2, \dots$) akan berbeda, seperti diilustrasikan oleh Gambar 1.6.



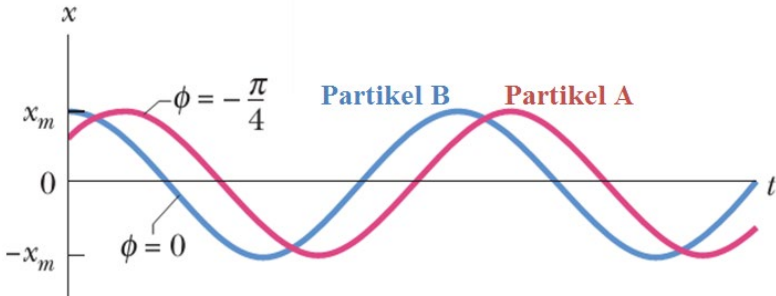
Gambar 1.6 Grafik simpangan partikel A dan B akibat nilai amplitudo berbeda.

Apabila amplitudo kedua partikel bernilai sama, tetapi frekuensi angular berbeda, maka grafik simpangan kedua partikel akan berbeda, seperti diilustrasikan oleh Gambar 1.7. Frekuensi angular partikel A lebih besar dibandingkan partikel B sehingga periode gerak harmonik partikel A lebih kecil dibandingkan partikel B.



Gambar 1.7 Grafik simpangan partikel A dan B akibat perbedaan nilai frekuensi angular.

Terakhir, apabila kedua partikel memiliki amplitudo yang sama, tetapi sudut fase ϕ berbeda, maka gerakan harmonik kedua partikel akan berbeda seperti diilustrasikan oleh Gambar 1.8.



Gambar 1.8 Grafik simpangan partikel A dan B akibat perbedaan nilai sudut fase ϕ . Partikel A dan B memiliki selisih sudut fasa sebesar $\pi/4$.

Partikel yang bergerak secara harmonik akan memiliki perpindahan yang sama saat waktu t dan $t + T$, sehingga

$$x(t) = x(t + T)$$

$$x_m \cos(\omega t) = x_m \cos(\omega t + \omega T) \dots\dots\dots 1.5)$$

Fungsi cosinus bersifat periodik setelah sudut fasanya bertambah sebesar 2π radian, sehingga

$$\omega t + 2\pi = \omega(t + T)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \dots\dots\dots 1.6)$$

Persamaan 1.6 secara eksplisit menyatakan bahwa nilai frekuensi angular berbanding terbalik dengan periode gerak harmonik. Semakin banyak gerak harmonik yang terjadi dalam selang waktu Δt maka semakin kecil periode gerak harmonik itu. Dengan mengkombinasikan persamaan 1.3 dan 1.6 maka diperoleh

$$\omega = 2\pi f \dots\dots\dots 1.7)$$

Berdasarkan Gambar 1.4, partikel yang bergerak harmonik akan memiliki kecepatan \vec{v} . Nilai kecepatan partikel setara dengan besar perpindahan yang dialami partikel per satu satuan waktu. Secara

matematis, kecepatan partikel sebagai fungsi waktu t dapat diungkapkan dengan persamaan 1.8,

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

$$v(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots 1.8)$$

Persamaan ini secara fisis menyatakan vektor kecepatan partikel yang bergerak harmonik berlawanan dengan perpindahannya. Asumsikan $\varphi = 0$ radian, maka saat $t = 0$ sekon, partikel memiliki kecepatan terkecil yaitu 0 m/s. Pada waktu ini, partikel sedang berada pada posisi simpangan maksimum (Gambar 1.4). Ketika $t = T/4$,

$$v(T/4) = -\omega x_m \sin\left(\omega \frac{T}{4}\right) = -\omega x_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4}\right)$$

$$v(T/4) = -\omega x_m \dots\dots\dots 1.9)$$

Pada saat ini, partikel bergerak ke kiri (tanda negatif) dengan kecepatan maksimum ωx_m . Ketika $t = T/2$,

$$v(T/2) = -\omega x_m \sin\left(\omega \frac{T}{2}\right) = -\omega x_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2}\right)$$

$$v(T/2) = 0 \dots\dots\dots 1.10)$$

kecepatan partikel kembali bernilai 0 m/s, artinya partikel dalam keadaan diam. Pada kondisi ini, partikel berada pada simpangan maksimum di sebelah kiri posisi kesetimbangan stabil. Selanjutnya, saat $t = 3T/4$,

$$v(3T/4) = -\omega x_m \sin\left(\omega \frac{3T}{4}\right) = -\omega x_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{3T}{4}\right)$$

$$v(3T/4) = \omega x_m \dots\dots\dots 1.11)$$

partikel kembali memiliki kecepatan maksimum ke arah kanan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai kecepatan partikel akan nol saat partikel mengalami simpangan maksimum dan bernilai maksimum saat partikel tepat berada di titik kesetimbangan stabil (simpangan bernilai nol). Kecepatan partikel mengalami perubahan setiap satuan waktu, sehingga partikel mengalami percepatan.

Percepatan partikel dapat diturunkan dari kecepatan partikel sebagai fungsi waktu t . Berdasarkan persamaan 1.8, maka percepatan partikel dapat diungkapkan sebagai berikut,

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots 1.12)$$

Asumsikan $\varphi = 0$ radian, maka partikel akan memiliki percepatan maksimum ketika nilai $\cos(\omega t)$ bernilai maksimum. Kondisi ini tercapai apabila $\omega t = n\pi$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Nilai $n = 1$ akan terpenuhi apabila $t = T/2$. Dengan demikian,

$$a(T/2) = -\omega^2 x_m \cos\left(\omega \frac{T}{2}\right) = -\omega^2 x_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2}\right)$$

$$a(T/2) = -\omega^2 x_m \dots\dots\dots 1.13)$$

Pada saat ini, partikel mengalami perpindahan ke arah kiri ($-x_m$) dengan gaya pemulih \vec{F}_r yang juga bernilai maksimum. Tanda negatif pada persamaan 1.13 menyatakan bahwa arah percepatan partikel berlawanan dengan arah perpindahannya. Arah percepatan partikel searah dengan gaya \vec{F}_r . Di sisi lain, partikel akan mengalami percepatan minimum ketika gaya \vec{F}_r bernilai minimum dan secara matematis $\cos(\omega t)$ bernilai minimum. Kondisi ini tercapai apabila $\omega t = (n/2)\pi$ ($n = 1, 3, 5, 7, \dots$). Nilai $n = 1$ akan terpenuhi apabila $t = T/4$. Dengan demikian,

$$a(T/4) = -\omega^2 x_m \cos\left(\omega \frac{T}{4}\right) = -\omega^2 x_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4}\right)$$

$$a(T/4) = 0 \dots\dots\dots 1.14)$$

percepatan partikel kembali bernilai 0 m/s^2 , artinya tidak ada resultan gaya yang bekerja pada partikel pada kondisi ini. Temuan ini sangat konsisten dengan sifat-sifat gaya pemulih, dimana nilai $\vec{F}_r = 0 \text{ N}$ ketika partikel berada pada posisi kesetimbangan stabil (TS).

Persamaan 1.12 juga dapat diungkapkan dalam besaran $x(t)$ seperti dinyatakan oleh persamaan 1.4. Dengan demikian,

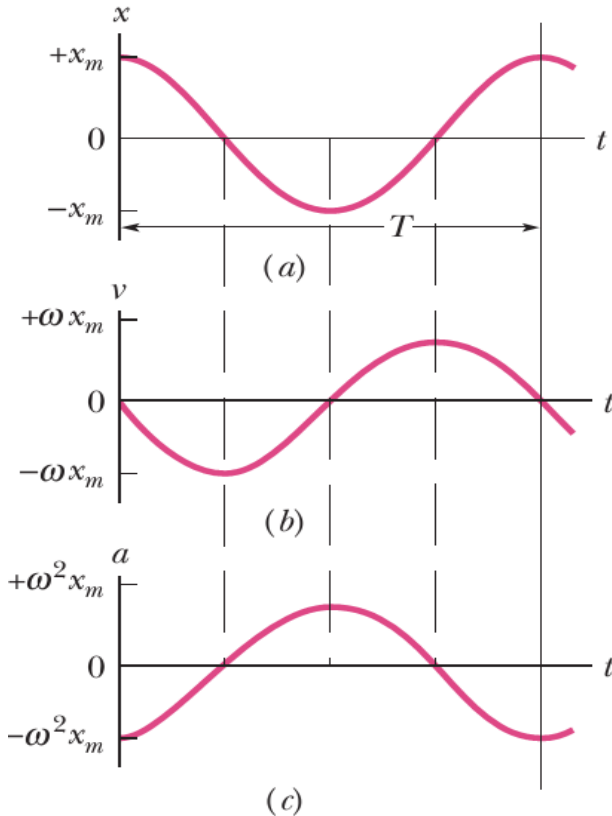
$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi)$$

$$a(t) = -\omega^2 x(t) \dots\dots\dots 1.15)$$

Dalam bentuk diferensial, maka persamaan 1.15 dapat diungkapkan sebagai berikut,

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \omega^2 x(t) = 0 \dots\dots\dots 1.16)$$

Persamaan 1.16 merupakan **persamaan diferensial gerak harmonik sederhana linear**. Hubungan antara simpangan partikel $x(t)$, kecepatan $v(t)$, dan percepatan partikel $a(t)$ secara grafis dapat diilustrasikan dengan Gambar 1.9.



Gambar 1.9 Grafik simpangan partikel (a), kecepatan partikel (b), dan percepatan partikel (c) sebagai fungsi waktu t .

Energi Pada Gerak Harmonik Sederhana

Dinamika partikel yang bergerak secara harmonik sederhana dapat diwakilkan dengan besaran energi yang dimiliki oleh partikel. Energi total E yang dimiliki partikel merupakan gabungan antara energi kinetik dan energi potensial. Berdasarkan syarat-syarat terjadinya gerak harmonik sederhana, gerakan partikel tidak terkendala oleh gaya eksternal baik berupa gaya gesekan antara permukaan partikel dengan permukaan bidang sentuh maupun gaya gesekan antara permukaan partikel dengan fluida di sekitarnya. Dengan demikian, tidak ada usaha oleh gaya-gaya eksternal tersebut dikerjakan pada partikel sehingga energi total partikel tetap lestari (*conserve*).

Energi kinetik partikel K selalu berubah terhadap waktu t karena energi kinetik partikel bergantung pada kecepatan partikel. Berdasarkan persamaan 1.8, nilai kecepatan partikel selalu berubah terhadap waktu. Oleh karena itu, ketika kecepatan partikel bernilai maksimum, maka energi kinetik partikel akan bernilai maksimum. Sebaliknya, ketika kecepatan partikel bernilai minimum, maka energi kinetik partikel bernilai minimum. Secara matematis, energi kinetik partikel dapat diungkapkan dengan persamaan 1.17,

$$K(t) = \frac{1}{2}mv(t)^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 x_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots 1.17)$$

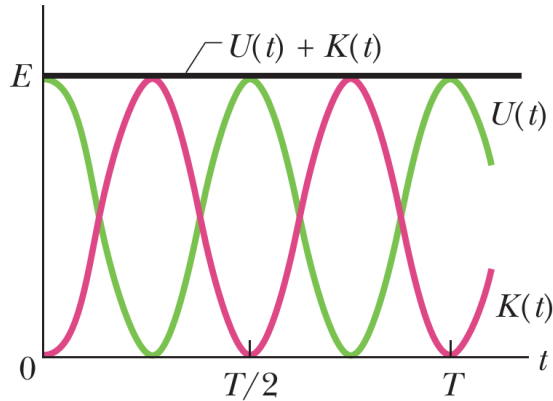
Energi potensial partikel U sebanding dengan kuadrat simpangan partikel $x(t)^2$. Hubungan ini juga menyatakan bahwa nilai U bergantung terhadap waktu t . Ketika partikel mengalami simpangan maksimum, maka energi potensial yang dimiliki partikel akan maksimum. Sebaliknya, ketika partikel berada pada posisi kesetimbangan stabil, energi potensial partikel akan minimum, yaitu 0 Joule. Secara matematis, energi potensial partikel dapat diungkapkan dengan persamaan 1.18,

$$U(t) = \frac{1}{2}kx(t)^2 = \frac{1}{2}kx_m^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots 1.18)$$

dimana k adalah konstanta yang bergantung pada massa partikel m dan frekuensi anguler ω . Jadi, energi potensial partikel dapat diungkapkan kembali dengan persamaan 1.19,

$$U(t) = \frac{1}{2}(m\omega^2)x_m^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots 1.19)$$

Secara grafis, plot energi kinetik dan energi potensial partikel sebagai fungsi waktu dapat diilustrasikan dengan Gambar 1.10.



Gambar 1.10 Grafik energi kinetik dan energi potensial partikel sebagai fungsi waktu t .

Gambar 1.10 secara visual menggambarkan energi total partikel yang bergerak harmonik sederhana selalu konstan. Secara matematis, persamaan energi total partikel dapat diungkapkan dengan persamaan 1.20,

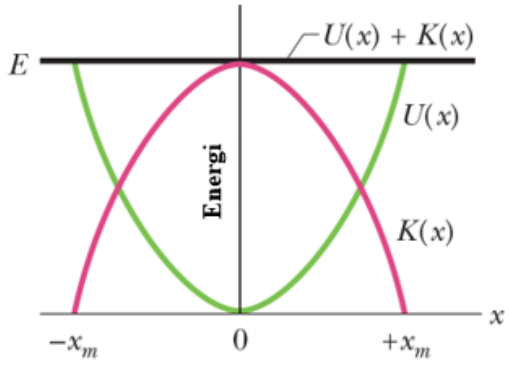
$$E = K(t) + U(t)$$

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 x_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} m \omega^2 x_m^2 \cos^2(\omega t + \varphi)$$

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 x_m^2 [\sin^2(\omega t + \varphi) + \cos^2(\omega t + \varphi)]$$

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 x_m^2 \dots\dots\dots 1.20)$$

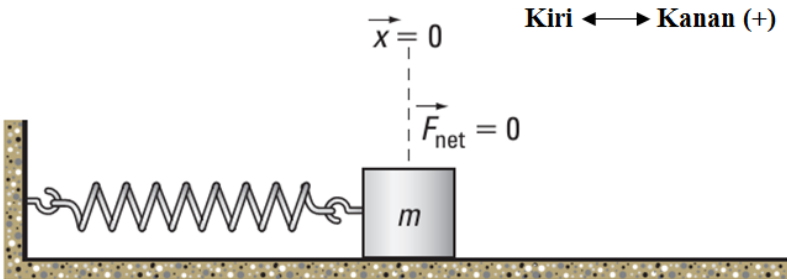
Energi total partikel berbanding lurus dengan kuadrat simpangan maksimum partikel. Semakin besar simpangan maksimum partikel maka semakin besar energi total partikel. Semakin besar frekuensi anguler partikel maka energi total partikel semakin besar pula. Sebaliknya, semakin besar periode gerak harmonik partikel, maka semakin kecil energi total partikel. Hubungan energi partikel terhadap simpangan $x(t)$ dapat diilustrasikan dengan Gambar 1.11.



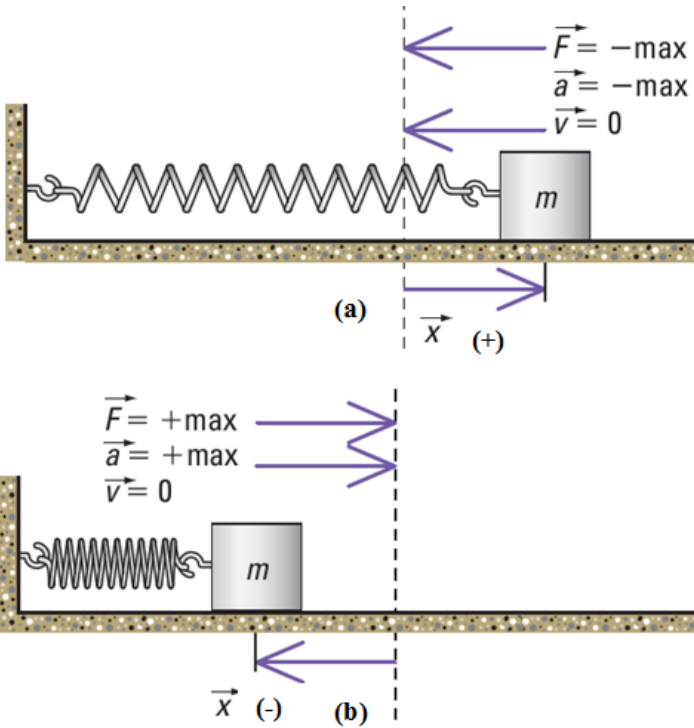
Gambar 1.11 Grafik hubungan energi partikel sebagai fungsi simpangan $x(t)$.

Osilator Harmonik Sederhana

Contoh riil osilator harmonik sederhana dalam kehidupan sehari-hari adalah benda yang dihubungkan pegas (Gambar 1.12). Benda bermassa m dihubungkan dengan pegas yang memiliki kekakuan k . Ketika pegas dalam keadaan normal, maka benda berada dalam setimbang di titik $x(t) = 0$. Ketika benda ditarik ke kanan, maka pegas akan meregang ke arah kanan (+), sehingga perpindahan benda m adalah positif. Saat benda m berpindah ke kanan, maka pegas akan memberikan tarikan sebesar \vec{F}_r yang arahnya ke kiri (Gambar 1.13a). Pada saat ini, benda akan mengalami percepatan yang arahnya juga ke kiri. Ketika benda disimpangkan secara maksimum, benda m akan mengalami gaya pegas maksimum sebesar \vec{F} dan mengalami percepatan maksimum sebesar \vec{a} . Kecepatan benda m bernilai nol karena benda m dipertahankan diam pada kondisi mula-mula sebelum akhirnya dilepas. Kondisi yang sama akan dialami benda m ketika berada di simpangan maksimum sebelah kiri (Gambar 1.13b).



Gambar 1.12 Ilustrasi osilator harmonik sederhana.



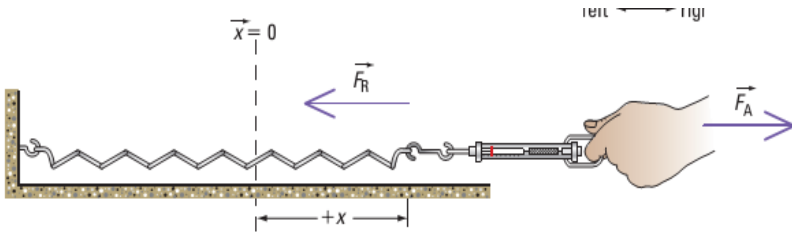
Gambar 1.13 Ilustrasi gerak osilator harmonik sederhana di sekitar titik setimbang.

Benda m akan mengalami gerak harmonik sederhana secara terus-menerus tentu dengan asumsi tidak terjadi gesekan antara permukaan bawah massa m terhadap permukaan atas bidang sentuh (lantai). Selain itu, gerak harmonik sederhana akan terjadi pada sistem pegas ini apabila kekakuan pegas k bersifat konstan, artinya besarnya gaya pegas yang bekerja pada massa m sebanding dengan perpindahan massa m atau pertambahan panjang pegas x . Kondisi ini memenuhi Hukum Hooke yang secara matematis dapat diungkapkan dengan persamaan 1.21,

$$\vec{F}_r \propto \vec{x} \dots\dots\dots 1.21)$$

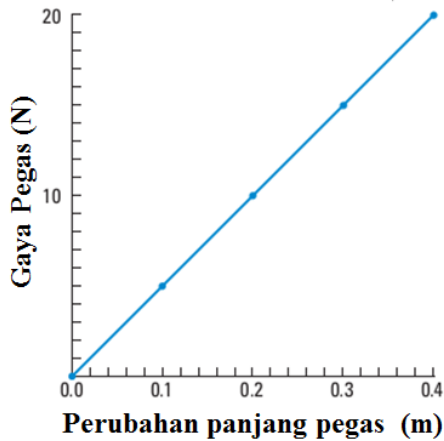
Perhatikan Gambar 1.14. Ketika pegas ditarik dengan gaya eksternal \vec{F}_A maka pegas akan menghasilkan gaya sebesar \vec{F}_r yang arahnya melawan arah gaya \vec{F}_A . Pada kondisi ini, resultan gaya yang bekerja

pada pegas adalah nol. Kondisi ini sama dengan massa m yang ditarik dengan gaya eksternal \vec{F}_A ke kanan untuk menyimpangkannya seperti Gambar (3.13a). Saat massa m dilepaskan maka massa m akan bergerak harmonik sederhana. Pada kondisi ini hanya gaya pemulih \vec{F}_r yang bekerja pada massa m .



Gambar 1.14 Ilustrasi gaya pemulih dan gaya eksternal yang bekerja pada benda.

Secara empiris, hubungan antara gaya pegas \vec{F}_r dan perubahan panjang pegas \vec{x} dapat diilustrasikan oleh Gambar 1.15.



Gambar 1.15 Hubungan gaya pegas dan perubahan panjang pegas.

Secara matematis, gaya pegas diungkapkan dengan persamaan 1.22,

$$\vec{F}_r = -k\vec{x} \dots\dots\dots 1.22)$$

Gaya pegas \vec{F}_r memiliki arah berlawanan terhadap arah simpangan benda m . Persamaan gerak benda m dapat diturunkan dari persamaan 1.22 dengan mengingat Hukum II Newton, yaitu

$$\vec{F} = m\vec{a} \dots\dots\dots 1.23)$$

Dengan demikian dalam bentuk skalar,

$$-kx = ma$$

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \dots\dots\dots 1.24)$$

Apabila persamaan 1.24 dibagi dengan m , maka diperoleh persamaan 1.25,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \dots\dots\dots 1.25)$$

Ingat bahwa simpangan pegas berubah terhadap waktu t sehingga dalam bentuk umum dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{k}{m}x(t) = 0 \dots\dots\dots 1.26)$$

Persamaan 1.26 adalah persamaan diferensial gerak harmonik sederhana yang telah diungkapkan sebelumnya dengan persamaan 1.16. Berdasarkan kedua persamaan ini, maka diperoleh hubungan

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots 1.27)$$

Berdasarkan persamaan 1.6 dan 1.7, maka

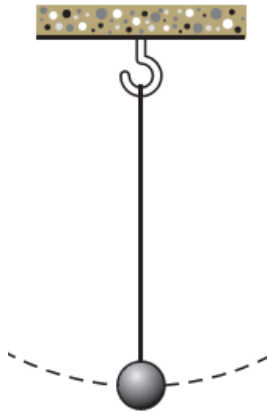
$$f = 2\pi\sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots 1.28)$$

$$T = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m}{k}} \dots\dots\dots 1.29)$$

Persamaan 1.28 dan 1.29 masing-masing menunjukkan bahwa frekuensi dan periode osilasi osilator harmonik pegas bergantung pada konstanta pegas k dan massa benda m . Semakin besar nilai k maka pegas semakin kaku, itu berarti frekuensi osilasi yang dimiliki benda m akan semakin besar. Sebaliknya, periode osilasi massa m akan semakin kecil jika pegas semakin kaku. Simpangan $x(t)$, kecepatan $v(t)$, dan percepatan partikel $a(t)$ massa m memenuhi persamaan 1.5, 1.8, dan 1.12.

Pendulum

Selain pegas, pendulum merupakan contoh lain osilator harmonik sederhana. Apabila sistem pegas merupakan contoh osilator harmonik linear, maka pendulum dapat dikelompokkan sebagai contoh osilator harmonik anguler. Pada sistem pegas, massa m menyimpang secara linear setiap waktu t sebesar $x(t)$. Sementara pendulum menyimpang secara anguler setiap waktu t sebesar $\theta(t)$ (Gambar 1.16).



Gambar 1.16 Ilustrasi pendulum dengan massa beban m dan panjang tali L . Massa m sedang berada pada posisi kesetimbangan stabil.

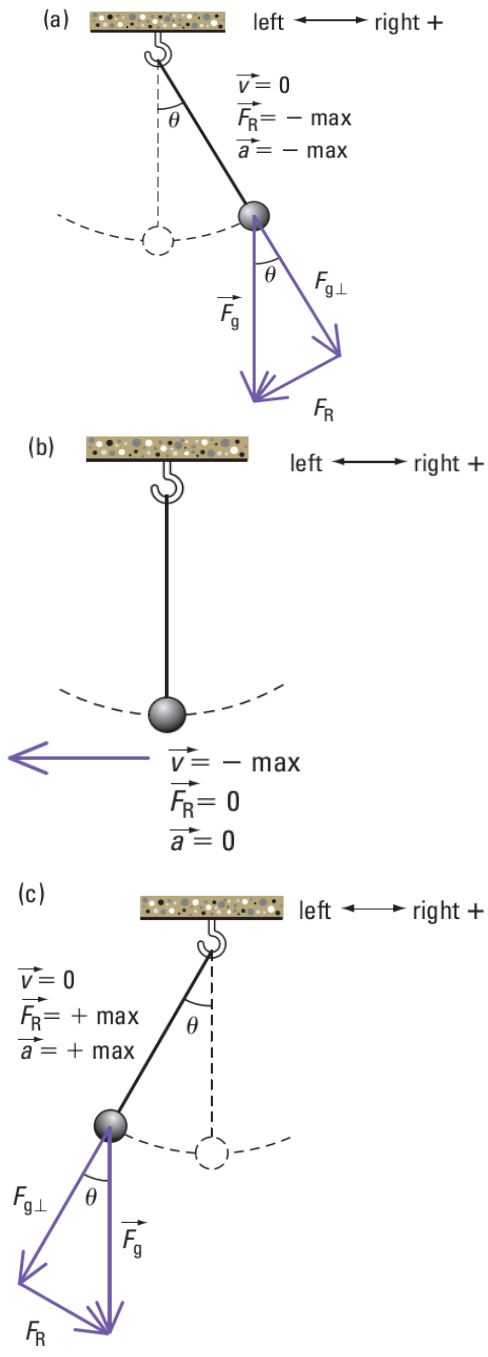
Pendulum ini dapat digunakan sebagai contoh osilator harmonik anguler dengan asumsi tali yang menggantung massa m bersifat sangat ringan (*light*), sehingga massa tali tidak dianggap berkontribusi terhadap gerakan massa m . Selain itu, gaya gesek massa m terhadap fluida di sekitarnya dianggap tidak ada. Tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada massa m termasuk gaya gesek pada permukaan massa m terhadap fluida di sekitarnya. Oleh karena itu, massa m hanya mengalami gaya gravitasi sebesar \vec{F}_g . Ketika massa m disimpangkan ke kanan sebesar

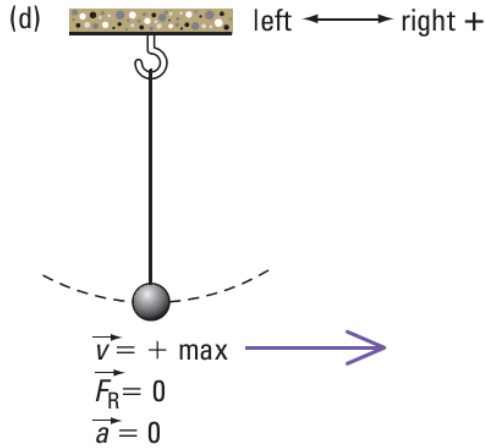
θ maka gaya gravitasi ini akan memiliki komponen tegak dan sejajar arah geraknya (Gambar 1.17a). Besarnya komponen gaya gravitasi tegak lurus dan sejajar arah gerak m adalah

$$F_{g\perp} = F_g \cos \theta \dots\dots\dots 1.30)$$

$$F_{g\parallel} = F_g \sin \theta \dots\dots\dots 1.31)$$

Komponen gaya gravitasi yang sejajar arah gerak benda m sekaligus berperan sebagai gaya pemulih \vec{F}_r . Gaya pemulih ini selalu mengarah ke posisi kesetimbangan stabil pendulum di titik TS. Ketika massa m disimpangkan ke kanan, maka gaya pemulih mengarah ke kiri (Gambar 1.17a). Ketika benda melintasi titik kesetimbangan TS gaya pemulih ini bernilai nol (Gambar 1.17b) sementara kecepatannya bernilai maksimum dan mengarah ke kiri, serta percepatannya minimum. Ketika melewati titik TS menuju simpangan ke kiri, arah gaya pemulih berbalik menuju ke kanan. Gaya pemulih ini semakin besar hingga mencapai maksimum ketika massa m berada pada posisi simpangan maksimum (Gambar 1.17c). Kecepatan massa m saat di posisi ini bernilai minimum dan percepatannya bernilai maksimum serta memiliki arah ke kanan. Selanjutnya, ketika massa m melewati titik TS kembali ke arah kanan, maka kecepatan massa m mencapai nilai maksimum (Gambar 1.17d).





Gambar 1.17 Ilustrasi gerak pendulum sederhana di sekitar titik kesetimbangan TS.

Berdasarkan Gambar 1.17, gaya pemulih \vec{F}_r , menghasilkan momen gaya $\vec{\tau}_o$ pada massa m terhadap titik poros O yang terletak di sumbu rotasi yaitu gantungan pendulum. Lengan momen ini memiliki besar yang sama dengan panjang tali L . Besarnya momen gaya $\vec{\tau}_o$ secara skalar dapat diungkapkan sebagai berikut,

$$\tau = -(F_g \sin \theta)L \dots\dots\dots 1.32)$$

Berdasarkan persamaan Hukum II Newton untuk gerak rotasi, maka

$$\tau = I\ddot{\theta} \dots\dots\dots 1.33)$$

dimana I adalah momen inersia pendulum dan $\ddot{\theta}$ adalah percepatan anguler pendulum. Kombinasi persamaan 1.32 dan 1.33 menghasilkan

$$-(F_g \sin \theta)L = I\ddot{\theta} \dots\dots\dots 1.34)$$

Apabila $F_g = mg$, maka

$$-(mg \sin \theta)L = I\ddot{\theta}$$

$$I\ddot{\theta} + (mgL)\sin \theta = 0$$

$$\ddot{\theta} + \frac{mgL}{I} \sin \theta = 0 \dots\dots\dots 1.35)$$

Untuk sudut simpangan kecil ($\theta \leq 15^\circ$), maka $\sin \theta \approx \theta$ sehingga

$$\ddot{\theta} + \frac{mgL}{I} \theta = 0 \dots\dots\dots 1.36)$$

Berdasarkan Gambar 1.17, besar sudut simpangan massa m berubah terhadap waktu t . Oleh karena itu, bentuk umum persamaan 1.36 dapat diungkapkan sebagai berikut,

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{mgL}{I} \theta(t) = 0 \dots\dots\dots 1.37)$$

Persamaan 1.37 merupakan persamaan diferensial gerak harmonik sederhana yang mirip dengan persamaan 1.16 dan 1.26. Persamaan ini memiliki bentuk angular karena variabel θ yang berubah terhadap waktu. Oleh karena itu,

$$\omega^2 = \frac{mgL}{I}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{mgL}{I}} \dots\dots\dots 1.38)$$

Berdasarkan persamaan 1.6 dan 1.7, maka

$$f = 2\pi \sqrt{\frac{mgL}{I}} \dots\dots\dots 1.39)$$

$$T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{mgL}} \dots\dots\dots 1.40)$$

Persamaan 1.39 dan 1.40 secara empiris menunjukkan bahwa frekuensi dan periode osilasi pendulum dipengaruhi oleh momen inersia pendulum. Semakin besar momen inersia pendulum, maka semakin besar periode osilasi pendulum dan semakin kecil frekuensi osilasi pendulum. Semua massa pendulum terkonsentrasi pada massa m . Apabila momen inersia pendulum

$$I = mL^2 \dots\dots\dots 1.41)$$

maka frekuensi dan periode osilasi pendulum menjadi,

$$f = 2\pi\sqrt{\frac{g}{L}} \dots\dots\dots 1.42)$$

$$T = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L}{g}} \dots\dots\dots 1.43)$$

Berdasarkan persamaan 1.42 dan 1.43, maka frekuensi dan periode osilasi pendulum tidak bergantung pada massa m , melainkan bergantung pada panjang tali L dan percepatan gravitasi g . Apabila pendulum diosilasikan di tempat yang memiliki percepatan gravitasi lebih kecil dari nilai percepatan gravitasi di permukaan Bumi, maka frekuensi osilasi pendulum akan semakin kecil dan periode osilasinya semakin besar.

Berdasarkan persamaan 1.37 dan 1.38, maka persamaan diferensial anguler pendulum dapat diungkapkan melalui persamaan 1.44,

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \omega^2\theta(t) = 0 \dots\dots\dots 1.44)$$

Solusi persamaan ini berupa simpangan pendulum, yaitu

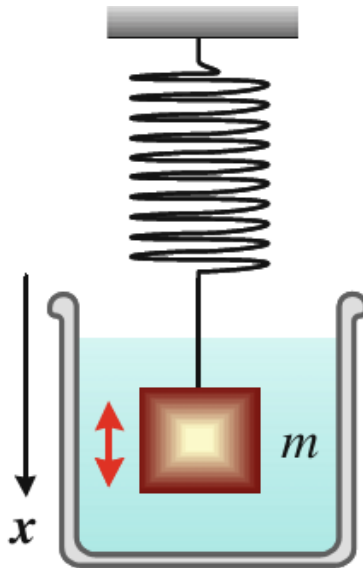
$$\theta(t) = \theta_m \cos(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots 1.45)$$

Apabila mula-mula pendulum disimpangkan ke kanan dengan sudut $\theta(t) = \theta(0) = \theta_m$ maka pendulum akan mencapai posisi kesetimbangan TS saat $t = T/4$ dan pendulum akan mencapai posisi simpangan maksimum di sebelah kiri saat $t = T/2$. Pendulum kembali melintasi titik TS saat $t = 3T/4$ dan pada akhirnya mencapai posisi awal kembali setelah $t = T$.

Osilasi Teredam

Gerak harmonik yang telah dibahas sejauh ini adalah gerak harmonik sederhana yang mana memenuhi keempat syarat seperti diuraikan pada subbab 1.2. Pada kenyataannya, gerak harmonik yang umumnya dapat dijumpai dalam berbagai fenomena sehari-hari tidak bersifat harmonik sederhana. Anggap saja sebuah massa m yang dihubungkan dengan pegas dibiarkan bergerak harmonik secara linear (Gambar 1.12). Massa m tentu akan mengalami gaya gesek pada permukaan bawahnya terhadap permukaan bidang sentuh lantai. Gaya gesek ini dapat

meredam gerakan harmonik massa m sehingga setelah selang waktu t tertentu massa m akan berhenti bergerak. Begitu pula dalam kasus pendulum (Gambar 1.16). Apabila pendulum dibiarkan bergerak harmonik secara angular, maka gesekan permukaan massa m tidak bisa dihindarkan dari gesekan fluida di sekitarnya. Gesekan fluida dalam konteks ini adalah gesekan udara di sekitar massa m dapat meredam gerakan harmonik pendulum sampai akhirnya berhenti. Gaya gesek yang bekerja pada permukaan massa m pada umumnya sebanding dengan kecepatannya dan memiliki arah berlawanan dengan arah gerak massa m . Dengan demikian, pada subbab ini kita akan menyebut istilah gerak harmonik teredam sebagai gerak osilasi teredam (*damped oscillation*) dengan konstanta redaman (*damping force*) b (Gambar 1.18).



Gambar 1.18 Ilustrasi osilasi teredam dengan konstanta redaman b .

Besarnya gaya redaman (*damping force*) yang bekerja pada sistem pegas pada Gambar 1.18 adalah

$$F_v = -bv \dots\dots\dots 1.46)$$

Persamaan gaya-gaya yang bekerja pada massa m adalah

$$-bv - kx = ma$$

$$ma + bv + kx = 0$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0 \dots\dots\dots 1.47)$$

Persamaan 1.47 merupakan persamaan diferensial orde dua. Dalam bentuk simpangan sebagai fungsi waktu, maka

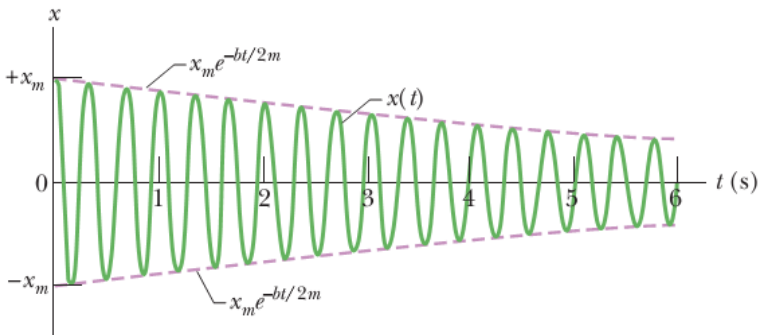
$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = 0 \dots\dots\dots 1.48)$$

Solusi persamaan 1.48 adalah

$$x(t) = x_m e^{-bt/2m} \cos(\omega't + \varphi)$$

$$x(t) = [x_m \cos(\omega't + \varphi)] e^{-bt/2m} \dots\dots\dots 1.49)$$

Persamaan 1.49 mirip dengan persamaan 1.4 hanya saja frekuensi angular massa m mengalami perubahan dan ada terdapat faktor pengali eksponen sebesar $e^{-bt/2m}$. Persamaan 1.49 mengungkapkan bahwa simpangan massa m berkurang secara eksponensial terhadap faktor $(-bt/2m)$. Secara grafis, plot simpangan massa m terhadap waktu t ditampilkan oleh Gambar 1.19,



Gambar 1.19 Grafik hubungan simpangan massa m terhadap waktu t .

Berdasarkan persamaan 1.49, misalkan $\varphi = 0$ radians dan $\gamma = b/2m$, maka persamaan ini akan menjadi

$$x(t) = x_m e^{-\gamma t} \cos(\omega't) \dots\dots\dots 1.50)$$

Dengan demikian,

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\gamma x_m e^{-\gamma t} \cos(\omega't) - \omega' x_m e^{-\gamma t} \sin(\omega't) \dots\dots\dots 1.51)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2x(t)}{dt^2} &= \gamma^2 x_m e^{-\gamma t} \cos(\omega' t) + \gamma x_m \omega' e^{-\gamma t} \sin(\omega' t) \quad \dots 1.52) \\ &+ \omega' \gamma x_m e^{-\gamma t} \sin(\omega' t) - \omega'^2 x_m e^{-\gamma t} \cos(\omega' t) \end{aligned}$$

Substitusi kedua hasil tersebut (1.51) dan (1.52) ke persamaan 1.48, sehingga

$$x_m e^{-\gamma t} \left[(m\gamma^2 - m\omega'^2 - b\gamma + k) \cos(\omega' t) + (2\omega' \gamma m - b\omega') \sin(\omega' t) \right] = 0 \quad \dots 1.53)$$

Persamaan ini mengindikasikan bahwa

$$x_m (m\gamma^2 - m\omega'^2 - b\gamma + k) = 0 \quad \dots 1.54)$$

agar persamaan 1.54 benar untuk semua nilai t . Dengan demikian,

$$\omega' = \sqrt{\gamma^2 - \frac{b\gamma}{m} + \frac{k}{m}} \quad \dots 1.55)$$

Gunakan $\gamma = b/2m$ sehingga diperoleh

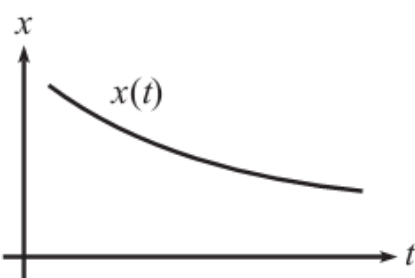
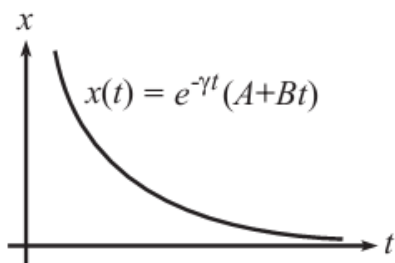
$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2} \quad \dots 1.56)$$

Frekuensi anguler massa m untuk kasus osilasi teredam lebih kecil dibandingkan dalam keadaan berosilasi bebas (*free oscillation* \equiv *simple harmonic motion*). Ketika konstanta redaman b bernilai besar, maka frekuensi anguler massa m akan bernilai nol,

$$\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2 = 0 \quad \text{dan} \quad b = 2\sqrt{km} \quad \dots 1.57)$$

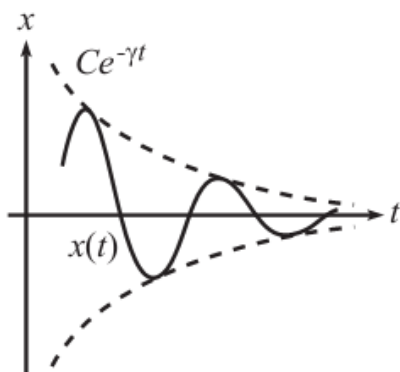
Secara fisis, kondisi ini menggambarkan massa m mengalami redaman kritis (*critical damping*), dimana massa m tidak sampai mengalami osilasi karena langsung teredam oleh gaya peredam sehingga gerakannya semakin pelan lalu berhenti. Apabila $b > 2\sqrt{km}$ maka massa m mengalami kelebihan redaman (*overdamping*) sehingga massa m tidak dapat mengalami osilasi terus menerus dan menjadi berhenti dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan keadaan teredam kritis.

Sementara itu, saat $b < 2\sqrt{km}$ maka massa m mengalami keadaan *underdamping*.



(a)

(b)



(c)

Gambar 1.20 Grafik keadaan *critical damping* (a), *overdamping* (b) dan *underdamping* (c).

Energi total massa m juga akan mengalami redaman setiap waktu t . Energi total massa m yang teredam diungkapkan dengan persamaan 1.58,

$$E(t) \approx \frac{1}{2} m \omega^2 x_m^2 e^{-(bt/m)} \dots\dots\dots 1.58)$$

Osilasi Paksa dan Resonansi

Pada subbab 1.6 telah dibahas secara detail tentang gerak harmonik teredam atau osilasi teredam. Benda yang berosilasi teredam tidak mengalami gaya harmonik eksternal. Pada benda yang berosilasi hanya bekerja gaya redaman \vec{F}_v dan gaya pemulih \vec{F}_r . Lantas, apa yang akan terjadi apabila sebuah osilator mengalami gaya harmonik eksternal? Misalkan gaya harmonik eksternal yang dikenakan pada massa m adalah

$$F_{ext} = F_o \cos(\omega t) \dots\dots\dots 1.59)$$

Persamaan gerak massa m dibawah pengaruh gaya pemulih \vec{F}_r , gaya redaman \vec{F}_v , dan gaya harmonik eksternal \vec{F}_{ext} adalah

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F_o \cos(\omega t) \dots\dots\dots 1.60)$$

Suku di sebelah kanan sama dengan tidak mengandung simpangan $x(t)$, sehingga solusi persamaan diferensial untuk osilator harmonik teredam paksa ini adalah

$$x(t) = \frac{F_o \cos(\omega t + \varphi_o)}{\sqrt{(m\omega^2 - k)^2 + b^2\omega^2}} \dots\dots\dots 1.61)$$

dimana φ_o merupakan tetapan fasa yang diberikan oleh

$$\sin \varphi_o = \frac{b\omega}{\sqrt{m^2\left(\omega^2 - \frac{k}{m}\right)^2 + b^2\omega^2}} \dots\dots\dots 1.62)$$

dimana $\frac{k}{m} = \omega_o$ yang merupakan frekuensi alamiah osilator.

Persamaan 1.62 dapat disajikan ulang menjadi

$$\sin \varphi_o = \frac{b\omega}{\sqrt{m^2(\omega^2 - \omega_o^2)^2 + b^2\omega^2}} \dots\dots\dots 1.63)$$

Berdasarkan persamaan 1.61, osilator berosilasi dengan frekuensi angular ω yaitu frekuensi gaya harmonik eksternal yang bekerja pada osilator. Osilator tidak mengalami redaman yang dibuktikan dengan tidak adanya faktor pengali eksponen

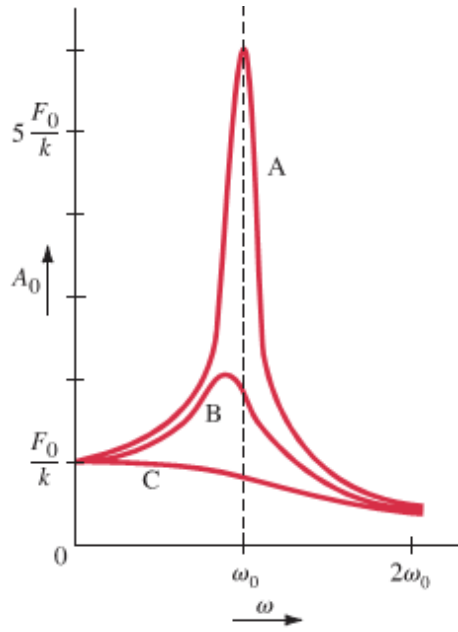
$e^{-(bt/2m)}$ pada amplitudo osilasi. Amplitudo osilasi memenuhi persamaan berikut,

$$x_m = \frac{F_o}{\sqrt{m^2(\omega^2 - \omega_o^2)^2 + b^2\omega^2}} \dots\dots\dots 1.64)$$

Berdasarkan persamaan 1.64, amplitudo osilasi bergantung pada frekuensi gaya harmonik eksternal ω yang memaksa osilasi massa m . Secara grafis, hubungan antara amplitudo osilasi terhadap frekuensi angular ω dapat diilustrasikan dengan Gambar 1.21. Saat gaya redaman sama dengan nol ($b = 0$) maka $\omega = \omega_o$. Dalam kondisi ini, osilator berosilasi dengan frekuensi alamiahnya yaitu

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} \dots\dots\dots 1.65)$$

Ketika gaya redaman tidak sama dengan nol, maka osilator akan mengalami redaman seperti ditampilkan oleh Gambar 1.21. Osilator mengalami redaman ringan (*light damped*) sehingga amplitudo osilasinya bernilai maksimum (kurva A). Jika gaya redaman semakin kuat maka osilator akan mengalami redaman berat (kurva B) dan over teredam – *overdamped* (kurva C).



Gambar 1.21 Grafik hubungan amplitudo osilasi x_m terhadap frekuensi osilasi ω .

Daftar Pustaka

- Giambattista, A., Richardson, B.C., & Richardson, R.C. (2010). *College Physics: With an Integrated Approach to Forces and Kinematics 3rd Edition*. The United State of America: McGraw-Hill
- Giancoli, C.G. (2009). *Physics for Scientist and Engineers with Modern Physics 4th Edition*. The United State of America: Pearson Prentice Hall.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2015). *Fundamental Physics 10th Edition*. New York: Addison-Wesley.
- Morin, D. (2008). *Introduction to Classical Mechanics with Problems and Solutions*. The United States of America: Cambridge University Press.
- Nolan, P.J. (2005). *Fundamental of College Physics 5th Edition*. The United State of America: Pearson Custom Publishing.
- Radi, H.A & Rasmussen, J.O. (2013). *Principle of Physics for Scientist and Engineers*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Serway, R.A & Jewett, J. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. Singapore: Brooks/Cole Cengage Learning.

Profil Penulis



I Putu Tedy Indrayana, S.Pd., M.Sc. Penulis lahir di Desa Gunaksa, Kecamatan Dawan, Kabupaten Klungkung Bali pada tahun 1991. Penulis menyelesaikan studi sarjana dari Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA Universitas Pendidikan Ganesha Singaraja pada tahun 2013 dan jenjang magister di Program studi S2 Fisika Departemen Fisika FMIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada tahun 2016. Saat ini penulis menjadi Staf Dosen Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Udayana. Penulis menekuni bidang Fisika Material dan Instrumentasi. Selain meneliti, penulis juga aktif menulis buku dibidang fisika dan kependidikan fisika. Bagi pembaca yang ingin mengetahui profil penulis secara lebih detail dapat mengunjungi laman website penulis melalui link <https://bit.ly/SidewiTedyFisika>.

GELOMBANG BERJALAN

Minarti

Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

Fenomena gelombang sering teramati di sekitar kita, seperti deburan ombak di lautan, semilir angin yang menggerakkan dedaunan, lantunan musik yang merdu, kedahsyatan efek guncangan gempa bumi, dan sebagainya. Selain untuk memahami berbagai fenomena alam, gelombang juga dapat memberikan dasar untuk pengembangan teknologi masa depan. Era revolusi industri sangat menunjang perkembangan teknologi yang memanfaatkan gelombang dengan pesat, terutama media komunikasi yang memudahkan belajar jarak jauh pada masa pandemi dan hingga kini (*pascapandemic*) masih tetap efektif digunakan, karena tak sekedar mendengar melalui gelombang suara, dengan adanya gelombang cahaya kita juga bisa berinteraksi dengan melihat secara virtual melalui *videocall* di *gadget* kita, serta dengan memanfaatkan internet berbasis *wifi* yang menggunakan gelombang elektromagnetik juga sangat memudahkan kita untuk mengakses informasi dari segala penjuru dunia. Dengan demikian, studi tentang gelombang menjadi sangat penting untuk dipelajari.

Umumnya, gelombang dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis gelombang utama antara lain gelombang mekanik yaitu gelombang berjalan yang membutuhkan medium perantara untuk perambatan energinya, seperti gelombang tali, gelombang suara, gelombang seismik dan sebagainya.

Lalu, gelombang elektromagnetik yaitu gelombang yang dapat merambat tanpa membutuhkan medium, seperti gelombang cahaya tampak, UV, sinar-X, dan sebagainya.



Gambar 2.1 Efek penjalaran gelombang seismik pada kejadian gempa di Palu, Sulawesi Tengah (Sumber : *Update Gempa Dan Tsunami Sulteng_ Dari Jumlah Korban Sampai Bantuan Internasional.Html*, n.d.)

Serta, gelombang materi yang merupakan dasar fisika kuantum, gelombang ini dikaitkan dengan prinsip dualitas partikel-gelombang, di mana partikel-partikel subatomik seperti elektron, proton, atau neutron dapat menunjukkan karakteristik gelombang. Dalam bab ini kita fokus membahas tentang gelombang berjalan yang seringkali kita aplikasikan sehari-hari, contohnya gelombang suara dalam komunikasi verbal, gelombang air, maupun gelombang seismik dalam pemetaan struktur bumi, pendeteksian gempa, dan upaya mitigasi kebencanaan.

Gerak Gelombang Sederhana

Gerak gelombang sederhana menjadi dasar untuk memahami berbagai fenomena gelombang, yaitu ketika sebuah sumber energi menghasilkan gangguan berupa getaran pada elemen awal, elemen ini akan mempengaruhi elemen-elemen tetangganya, sehingga energi dari gangguan tersebut merambat melalui medium secara berurutan, dengan kecepatan rambat yang bergantung pada properti mediumnya.

Seperti pada fenomena keriuhan sorak para penonton yang memperagakan *Mexican wave*, yaitu ketika sekelompok kecil penonton mulai bangkit berdiri dan mengangkat tangan, lalu gerakan tersebut diikuti oleh penonton di sebelah mereka dan seterusnya hingga ujung stadion, yang memvisualisasikan efek gelombang berjalan yang melintasi kerumunan penonton.



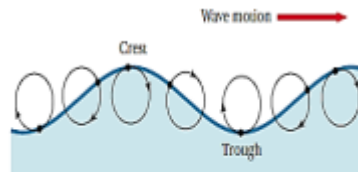
Gambar 2.2 Keriuhan Mexican wave saat piala dunia 2022 (Sumber : *Qatar Equips 15,000 Cameras with Facial Recognition for Soccer World Cup 2022 _ Biometric Update.Html*, n.d.)

Penonton hanya bergerak naik turun tanpa perlu bergeser kiri/kanan, sedangkan energi yang dihasilkannya merambat ke arah sebelah hingga ujung stadion. Hal ini menunjukkan gelombang berjalan dapat mentransfer energi tanpa mentransfer massa materi elemennya.

Begitupula ketika rintik hujan yang terjatuh di atas permukaan kolam akan menimbulkan riak gelombang air yang melintas dan membentuk pola gerakan harmonik sederhana (GHS) yang membentuk puncak dan palung / lembah gelombang dengan pola lingkaran konsentris yang bergerak menyebar ke arah luar seperti pada gambar 2.3 (Young et al., 2012). Penjalaran gelombang pada air mengakibatkan pergerakan segmen kecil molekul air dengan pola kombinasi antara transversal dan longitudinal (detailnya akan dibahas di subbab selanjutnya) sehingga membentuk pola radial (Gambar 2.4). Gerak gelombang sederhana ini dapat terjadi dalam berbagai medium seperti air, udara, atau bahkan dalam medium padat seperti tali atau pegas (Halliday et al., 2008).



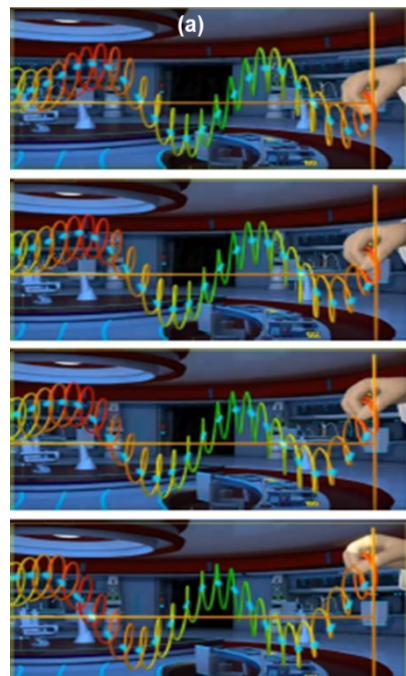
Gambar 2.3 Gelombang berjalan pada air berbentuk radial (Sumber : Young et al., 2012)



Gambar 2.4 Kondisi permukaan air yang diberikan usikan sehingga menunjukkan pergerakan molekul air secara radial (Sumber : Halliday et al., 2008)

Gelombang Transversal

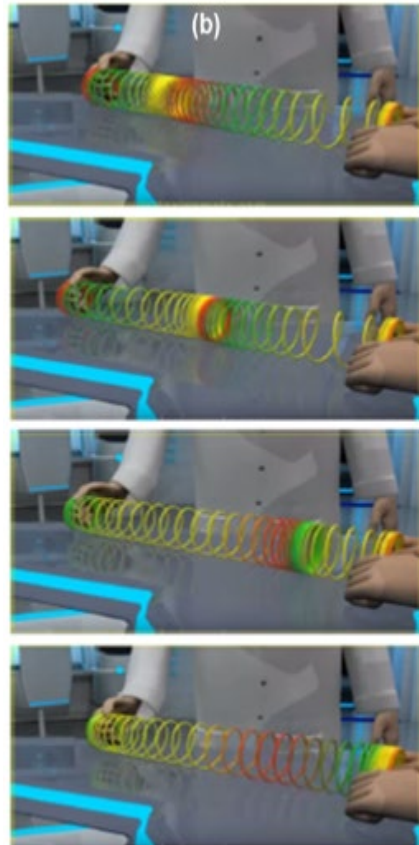
Gelombang transversal adalah jenis gelombang berjalan dengan pola gerakan elemen mediumnya tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang itu sendiri (Tipler & Mosca, 2008). Selain pada gelombang tali, gelombang transversal juga dapat disimulasikan menggunakan slinki. Adanya usikan pada ujung slinki dalam arah tegak lurus terhadap panjang mediumnya, mengakibatkan elemen slinki tampak bergerak



ke atas dan ke bawah sejalan dengan osilasi gelombang, sementara energi gelombang merambat secara horizontal atau sepanjang jalur rambatan gelombang (Abdullah, 2017).

Gelombang Longitudinal

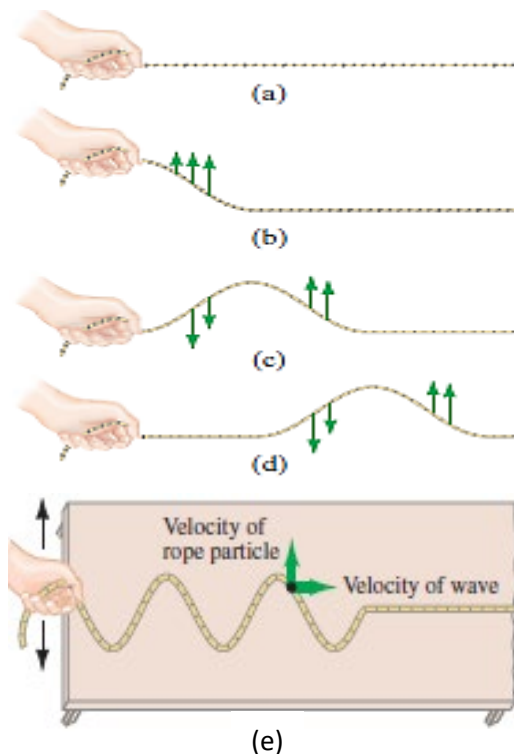
Gelombang longitudinal adalah jenis gelombang berjalan dengan pola getaran elemen medium bergerak sejajar terhadap arah perambatan gelombang itu sendiri. Sementara energi gelombang merambat sepanjang arah rambatan gelombang, contohnya pada gelombang ultrasonik. Gelombang ultrasonik adalah gelombang dengan frekuensi di atas rentang pendengaran manusia. Gelombang ini digunakan dalam aplikasi seperti pencitraan medis dan pengukuran jarak, di mana elemen-elemen medium bergerak sepanjang arah perambatan gelombang ultrasonik. Secara sederhana, gelombang jenis ini dapat disimulasikan menggunakan slinki, dimana salah satu ujungnya ditekan dan didorong sejajar dengan panjang slinki, maka tampak elemen-elemen mediumnya akan bergerak maju dan mundur seiring dengan osilasi gelombangnya yang



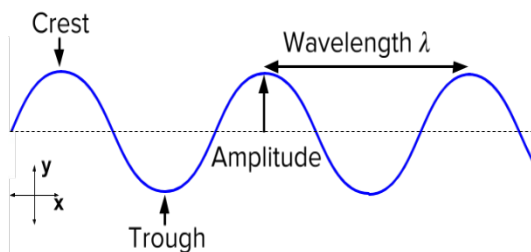
Gambar 2.5 Gelombang Transversal (a) dan Gelombang Longitudinal (b)
(Sumber : Abdullah, 2017)

membentuk zona rapatan (*compression*) dan zona regangan (*expansion / rarefaction*) (Abdullah, 2017).

Gelombang Periodik



Gambar 2.6 Gelombang berjalan pada tali
(Sumber : Giancoli, 2016)



Gambar 2.7 Karakteristik Gelombang
berjalan (Sumber : *Wave Characteristics
Review (Article_Khan Academy.Html, n.d.)*)

Gelombang periodik adalah jenis gelombang berjalan akan beresilasi secara terus menerus, yang dapat dijelaskan menggunakan fungsi sinusoidal (sinus ataupun cosinus) baik dalam domain ruang dan waktu. Jika kita tinjau gerak gelombang berjalan pada tali yang direntangkan sepanjang garis lurus (Gambar 2.6), dimana posisi

kesetimbangannya saat sistem tali dalam keadaan diam (a), lalu ketika satu bagian tali terganggu oleh usikan yang ditimbulkan oleh gerakan tangan (b), getaran tersebut akan merambat ke bagian tali yang lain berupa undulasi gelombang yang berupa pulsa. Pulsa yang merambat

melalui medium tali akan mengakibatkan elemen tali ikut bergerak ke atas ataupun ke bawah (c, d), sementara energi dari gelombang tersebut akan ditransfer sepanjang medium perambatannya ke arah sumbu tali (e) dengan kecepatan tertentu yang bergantung pada tegangan tali dan massa per unit panjang tali sebagai properti medium perambatannya. (Giancoli, 2016). Ada beberapa besaran fisis yang dapat menggambarkan karakteristik gelombang berjalan secara periodik antara lain:

Amplitudo (*Amplitude, A*) yaitu jarak simpangan maksimum suatu titik pada medium terhadap titik kesetimbangannya, yang dapat bernilai positif disebut puncak (*crest*) ataupun negatif disebut palung atau lembah (*trough*); Panjang gelombang (*Wavelength, λ*) adalah jarak antara dua titik yang memiliki keadaan osilasi yang sama membentuk satu siklus gelombang. Misal jarak puncak ke puncak gelombang yang berdekatan, ataupun jarak dua lembah yang berdekatan seperti yang ditunjukkan gambar 2.7. Sama halnya dengan panjang gelombang di permukaan air juga ditunjukkan pada gambar 2.3; Periode (*Period, T*) adalah waktu yang diperlukan oleh satu titik pada medium kembali ke keadaan osilasi semula, atau membentuk satu siklus gelombang. Sementara, seberapa banya jumlah rangkaian siklus gelombang yang terbentuk dalam satu detik, dinyatakan sebagai frekuensi (*frequency, f*) (Khan, n.d.),

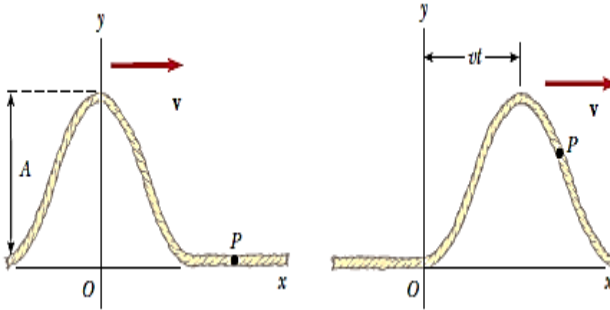
Laju Gelombang

Jika kita tinjau sebuah pulsa gelombang yang merambat sepanjang bentangan tali dengan laju konstan v . Gambar 2.8a menunjukkan bentuk dan posisi pulsa pada waktu $t = 0$ yang dapat diwakili oleh suatu fungsi matematika yang akan kita tulis sebagai $y(x, 0) = f(x)$. Ketika pulsa gelombang bergerak ke kanan sejauh vt dalam waktu t , dengan asumsi bentuk pulsa tidak berubah seiring waktu, dengan kelajuan v (Gambar 2.8b), sehingga posisi vertikalnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$y = f(x - vt) \tag{2.1}$$

Sedangkan, jika pulsa gelombangnya bergerak ke kiri, maka:

$$y = f(x + vt) \tag{2.2}$$



Gambar 2.8 Pulsa gelombang yang merambat secara 1D dengan kecepatan konstan v pada saat (a) $t=0$, dan (b) t , bergerak ke arah kanan sejauh vt (Sumber : Halliday et al., 2008)

Perpindahan y disebut sebagai fungsi gelombang, yang bergantung pada x dan t , dan sering dituliskan sebagai $y(x, t)$, dibaca "y sebagai fungsi dari x dan t ". Jika kita amati sebuah titik/elemen P pada tali, yang berada pada nilai koordinat x tertentu. Sebelum pulsa tiba di P , koordinat y dari titik ini adalah nol. Saat gelombang melewati P , koordinat y dari titik ini meningkat, mencapai nilai maksimum, dan kemudian berkurang menjadi nol. Oleh karena itu, fungsi gelombang $y(x, t)$ dapat mewakili koordinat y sebagai fungsi posisi transversal, dari setiap titik/elemen P pada medium x di setiap waktu t (Serway & Jewett, 2014).

Untuk sebuah pulsa yang bergerak tanpa mengubah bentuknya, misal berupa puncak seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8, maka untuk menemukan kelajuan pulsa tersebut, kita dapat menghitung sejauh mana puncak tersebut bergerak dalam waktu singkat dan kemudian membagi jarak ini dengan interval waktunya. Untuk mewakili persamaan gerakan dari puncak pada $t = 0$, puncak berada di $x = x_0$; sementara pada waktu dt nanti, puncak berada pada $x = x_0 + vdt$, sehingga puncak telah bergerak sejauh $dx = (x_0 + vdt) - x_0 = vdt$ sehingga : (Halliday et al., 2008)

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \tag{2.3}$$

Di mana v adalah laju gelombang, λ adalah panjang gelombang, T adalah periode gelombang, dan f adalah frekuensi gelombang. Jika panjang gelombang dan periode diberikan, laju gelombang dapat

dihitung. Satuan umum untuk laju gelombang adalah meter per detik (m/s).

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi laju gelombang antara lain: *Jenis medium*, setiap medium memiliki kecepatan gelombang karakteristiknya sendiri. Misalnya, kecepatan suara berbeda antara udara, air, dan padatan karena perbedaan dalam sifat fisik dan elastisitas medium tersebut; *Sifat fisik medium*, elastisitas dan kepadatan medium dapat mempengaruhi laju gelombang. Medium yang lebih elastis atau memiliki kepadatan yang lebih rendah umumnya memiliki laju gelombang yang lebih tinggi; *Suhu*, juga dapat memengaruhi laju gelombang, terutama dalam medium seperti udara atau gas. Gelombang suara, misalnya, memiliki laju yang lebih tinggi pada suhu yang lebih tinggi. Laju gelombang dapat bervariasi tergantung pada sifat medium yang dilalui oleh gelombang tersebut, misalnya laju gelombang tali yang bergerak secara transversal akan bergantung pada tegangan tali, F_T dan dengan massa per unit panjang talinya, μ .

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \sqrt{\frac{F_T}{\text{m/l}}} \quad (2.4)$$

Persamaan di atas secara kualitatif sesuai dengan prinsip mekanika Newton, ketika tegangan pada tali semakin besar, maka kontak elemen/segmen pada tali akan semakin rapat, sehingga laju perambatannya pun semakin cepat. Begitu pula, jika massa per unit panjangnya semakin besar maka inerti tali pun semakin besar, sehingga laju perambatan gelombangnya pun akan semakin lambat. Laju gelombang longitudinal memiliki bentuk serupa, yaitu:

$$v = \sqrt{\frac{\text{Faktor Gaya Elastik}}{\text{Faktor Inerti}}}$$

Jika gelombang longitudinal yang merambat pada medium yang solid, maka:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

Sementara, jika merambat pada medium liquid atau gas maka berlaku:

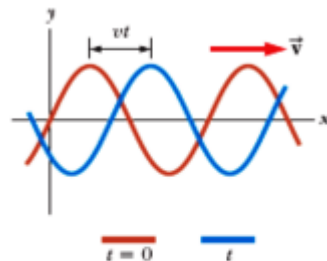
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.7)$$

Di mana E adalah modulus elastik pada material, B adalah modulus bulk, dan ρ adalah densitasnya (Giancoli, 2016).

Beberapa fenomena gelombang alami merupakan kombinasi dari kedua jenis gelombang tersebut, baik transversal maupun longitudinal, seperti pada gelombang air (Gambar 2.4) yang menunjukkan variasi pergerakan elemen-elemen air ke arah vertikal sebagai gelombang transversal dan pergerakan maju mundur ke arah horizontal sebagai gelombang longitudinal, sehingga membentuk pola radial. Begitupun pada gelombang seismik yang ditimbulkan oleh sumber gempa bumi (Gambar 2.1), gelombang seismik merambat secara tiga dimensi (3D) ke segala arah dengan kombinasi kedua gelombang tersebut. Gelombang seismik yang merambat secara longitudinal dengan pola kompresi akan lebih laju daripada gelombang transversal, dengan kisaran 7 sampai 8 km/s di dekat permukaan, gelombang longitudinal ini sampai lebih awal ke seismograf, sehingga disebut dengan gelombang primer (*P waves*). Sedangkan, gelombang transversal yang tiba lebih lambat, dengan kisaran 4 sampai 5 km/s di dekat permukaan, akan terekam setelahnya di seismograf, sehingga disebut dengan gelombang sekunder (*S waves*). Berdasarkan rekaman interval waktu tiba dari kedua gelombang tersebut, maka jarak dari titik penerima sinyal seismik (seismograf) ke titik pusat gelombang seismik di bawah permukaan (hiposenter) dapat ditentukan. Secara sederhana, jarak tersebut adalah radius dari sebuah bola imajiner yang berpusat pada seismograf, dengan menggunakan bola imajiner dari tiga atau lebih stasiun pemantauan yang berbeda dan terletak jauh satu sama lain, titik perpotongan dari beberapa bola imajiner tersebut akan menunjukkan area tempat terjadinya gempa bumi. (Serway & Jewett, 2014)

Persamaan Umum Gelombang

Persamaan umum gelombang berjalan dengan pola gerak periodik dapat dijelaskan menggunakan fungsi dalam domain ruang dan waktu. Pada gambar 2.9 menunjukkan gambaran singkat dari gelombang berjalan yang berbentuk sinusoidal, saat $t=0$ ditampilkan dengan kurva berwarna merah. Fungsi yang menggambarkan posisi partikel dalam medium ketika gelombang berjalan adalah:



Gambar 2.9 Gelombang sinusoidal yang merambat ke arah kanan dengan kelajuan v (Sumber : Serway & Jewett, 2014)

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (2.8)$$

Sementara, ketika gelombang tersebut bergerak ke kanan dengan kecepatan v di saat t , seperti yang ditunjukkan oleh kurva berwarna biru, maka:

$$y = A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right] \quad (2.9)$$

Dimana A merupakan Amplitudo gelombang dan λ adalah panjang gelombang.

Sementara, Jika gelombang bergerak ke kiri maka besaran $(x - vt)$ digantikan dengan $(x + vt)$ seperti yang telah kita bahas sebelumnya (Persamaan 2.2). Menurut definisi, gelombang sinusoidal melakukan osilasi atau berjalan bolak-balik sejauh satu panjang gelombang (λ) dan dalam satu periode (T). Oleh karena itu, laju gelombang, panjang gelombang, dan periodenya saling berhubungan seperti pada persamaan 2.3, sehingga persamaan 2.9 dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$y = A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (2.10)$$

Bentuk fungsi gelombang ini menunjukkan sifat periodik dari y . Dimana y mendeskripsikan perpindahan titik saat berosilasi yang sering digunakan sebagai notasi singkat dari $y(x, t)$. Pada waktu t tertentu, y memiliki nilai yang sama pada posisi x , $x + \lambda$, $x + 2\lambda$, dan seterusnya. Sementara, pada posisi x tertentu, nilai y sama pada waktu t , $t + T$, $t + 2T$, dan seterusnya. Kita dapat menyatakan fungsi gelombang dalam bentuk yang nyaman dengan mendefinisikan dua kuantitas lainnya, yaitu bilangan gelombang sudut (k) (biasanya disebut bilangan gelombang saja) dan frekuensi sudut (ω):

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Berdasarkan persamaan 2.3, 2.11 dan 2.12, maka laju gelombang sinusoidal dapat juga didefinisikan sebagai:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{2\pi/k}{2\pi/\omega} = \frac{\omega}{k} \quad (2.13)$$

Sehingga, persamaan (2.10) dapat disederhanakan menjadi:

$$y = A \sin(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

Persamaan gelombang sinusoidal pada 2.14 mengasumsikan pergeseran vertikal y adalah nol (saat $x = 0$, dan $t = 0$). Sedangkan jika tidak, maka fungsi gelombang umumnya dinyatakan sebagai berikut:

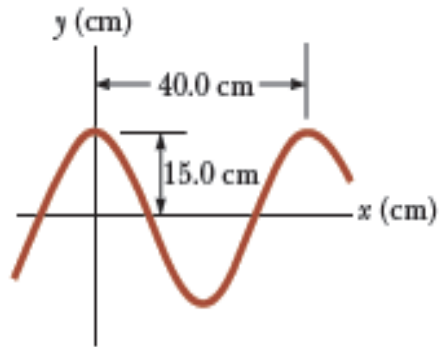
$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \phi_0) \quad (2.15)$$

Dimana ϕ_0 adalah konstanta fase atau sering disebut sudut fase awal, sedangkan semua suku yang ada dalam tanda kurung pada persamaan tersebut ($kx - \omega t + \phi_0$) disebut dengan fase gelombang. Ketika kita mengamati gelombang pada suatu waktu tertentu, fase gelombang memberikan informasi tentang sejauh mana gelombang telah maju dalam siklusnya. Misalnya, fase nol menunjukkan posisi awal gelombang saat dimulainya dalam siklus pertama, sedangkan fase 180 derajat atau π radian menunjukkan posisi gelombang di tengah siklus. Konsep fase gelombang penting dalam analisis dan pemodelan gelombang untuk memahami perilaku gelombang, interferensi, dan superposisi (akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya).

Contoh Soal:

Gelombang Sinusoidal yang berjalan ke arah x (positif) memiliki amplitudo 15 cm, dengan panjang gelombang 40 cm dan frekuensi 8 Hz. Perpindahan vertikal pada medium adalah 15 cm (saat $x = 0$, dan $t = 0$)

- Tentukan bilangan gelombang (k), periode (T), frekuensi sudut (ω), dan laju gelombang (v).
- Tentukan konstanta fase (ϕ), dan persamaan umum gelombangnya!



Gambar 2.10 Ilustrasi gelombang sinusoidal

Solusi:

- a) Menentukan bilangan gelombang (k) menggunakan persamaan 2.11, yaitu:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{40 \text{ cm}} = 15.71 \text{ rad/m}$$

Menentukan periode (T) menggunakan hubungan frekuensi dan periode, yaitu:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8} = 0.125 \text{ s}$$

Menentukan frekuensi sudut (ω) menggunakan persamaan 2.12, yaitu:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = 2\pi(8) = 50.26 \text{ rad/s}$$

Menentukan laju gelombang (v) menggunakan persamaan 2.13, yaitu:

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{50.26}{15.7} = 3.2 \text{ m/s}$$

- b) Dengan mensubstitusi $A=15 \text{ cm}$, dimana $y=15 \text{ cm}$ (saat $x = 0$, dan $t = 0$).maka untuk menentukan konstanta fase (ϕ) dapat menggunakan persamaan 2.15, yaitu:

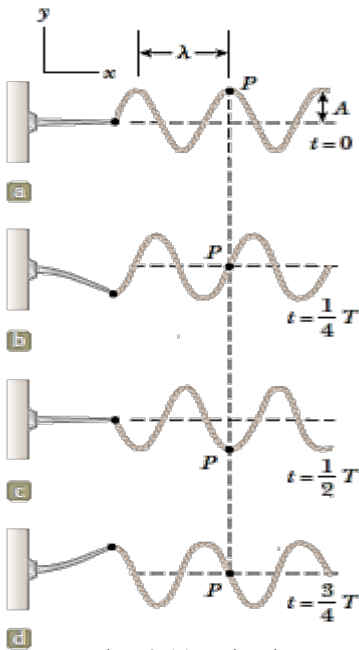
$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \phi) \rightarrow 0.15(0,0) = 0.15 \sin(\phi)$$

$$\sin(\phi) = 1 \rightarrow \phi = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

Sehingga, persamaan umum gelombangnya:

$$y = A \sin\left(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) = A \cos(kx - \omega t)$$

$$y(x, t) = 0.15 \cos(15.71x - 50.26t)$$



Gambar 2.11 Gelombang sinusoidal pada tali (Sumber : Serway & Jewett, 2014)

Jika kita perhatikan gambar 2.11, ketika kita menghubungkan ujung tali dengan sumber yang bergetar dalam gerak harmonik sederhana, maka setiap elemen tali (seperti titik P) akan berosilasi secara vertikal dengan membentuk pola gelombang sinusoidal. Setiap elemen tali dapat dianggap sebagai osilator harmonik sederhana yang bergetar dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi getaran sumbernya. Meskipun setiap elemen tali bergetar dalam arah y, gelombang bergerak ke kanan dalam arah x dengan kecepatan v. Saat $t=0$ sebagai waktu awal, di mana konfigurasi tali juga berada pada $x=0$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11a, maka fungsi gelombangnya dapat ditulis seperti persamaan 2.14. Karena y bergantung baik pada x maupun t. Dalam operasi $\frac{\partial y}{\partial t}$,

misalnya, kita mengambil turunan terhadap t sambil menjaga x tetap konstan, dan begitupun sebaliknya. Sehingga, kecepatan dan percepatan dari elemen-elemen tali merupakan turunan parsial. (Serway & Jewett, 2014)

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\omega A \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\omega^2 A \sin(kx - \omega t) = -\omega^2 y$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = kA \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial v}{\partial x} = -k^2 A \sin(kx - \omega t) = -k^2 y$$

Secara sederhana keempat persamaan di atas dapat dihubungkan menjadi:

$$\frac{\partial^2 y / \partial x^2}{\partial^2 y / \partial t^2} = \frac{k^2}{\omega^2} = \frac{1}{v^2}$$

Dengan mengingat adanya hubungan seperti pada persamaan 2.13, maka:

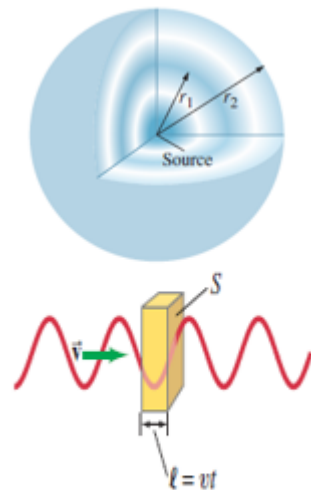
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

Persamaan 2.16 merupakan bentuk umum persamaan gelombang satu dimensi. Untuk gelombang yang merambat dalam ruang lebih dari satu dimensi, maka persamaannya dapat diperluas dari persamaan tersebut. Misalkan $\Psi(x, y, z)$ adalah simpangan gelombang yang merambat dalam ruang tiga dimensi (3D), sehingga persamaan yang dipenuhi gelombang sinusoidalnya menjadi : (Abdullah, 2017)

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.17)$$

Energi dan Daya Gelombang

Gelombang berjalan berperan memindahkan energi dari sumber ke partikel-partikel medium yang dilaluinya. Energi ini terkait dengan amplitudo gelombang dan luas area di bawah kurva gelombang, dalam gelombang transversal, energi terkait dengan amplitudo osilasi elemen-elemen medium. Sedangkan dalam gelombang longitudinal, energi terkait dengan variasi tekanan atau rapat elemen medium. Saat sumber getar melakukan kerja pada ujung tali, getaran tersebut menghasilkan gelombang yang berjalan dengan pola spheris menjauh dari titik pusat ke segala arah dalam sistem tali, sejumlah energi yang ditransfer berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo gelombangnya $E = \frac{1}{2} kA^2$ (seperti yang telah dibahas pada GHS), di



Gambar 2.12 Gelombang yang berjalan dengan pola spheris (atas), dan menentukan energi gelombang pada tali (bawah) (Sumber : Giancoli, 2016)

mana k dapat dinyatakan dalam hubungan $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (Halliday et al., 2008).

Jika kita tinjau sebagian kecil dari medium tali (Gambar 2.13) dengan panjang l , luas penampang S , dan massa medium $m = \rho V$, di mana ρ adalah densitas medium pada volume $V = Sl$. Sehingga energi gelombang yang berjalan melalui medium tersebut dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(\omega^2 m)A^2 \\
 E &= \frac{1}{2}(\omega^2(\rho V))A^2 = \frac{1}{2}(\omega^2(\rho(Sl)))A^2 \\
 &= \frac{1}{2}(\omega^2(\rho(Svt)))A^2
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Jika sumber titik menghasilkan gelombang secara merata ke segala arah, maka energi pada suatu jarak dari sumber akan terdistribusi merata pada permukaannya ($A = 4\pi r^2$). Daya gelombang merupakan sejumlah energi yang dilewatkan oleh gelombang melalui unit area dalam satu unit waktu, yang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \rho S v \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho S v f^2 A^2
 \tag{2.19}$$

Daya gelombang juga bergantung pada intensitas gelombang, dimana intensitas gelombang menyatakan daya gelombang per satu luas permukaan yang dilewati oleh gelombang, sehingga: (Giancoli, 2016)

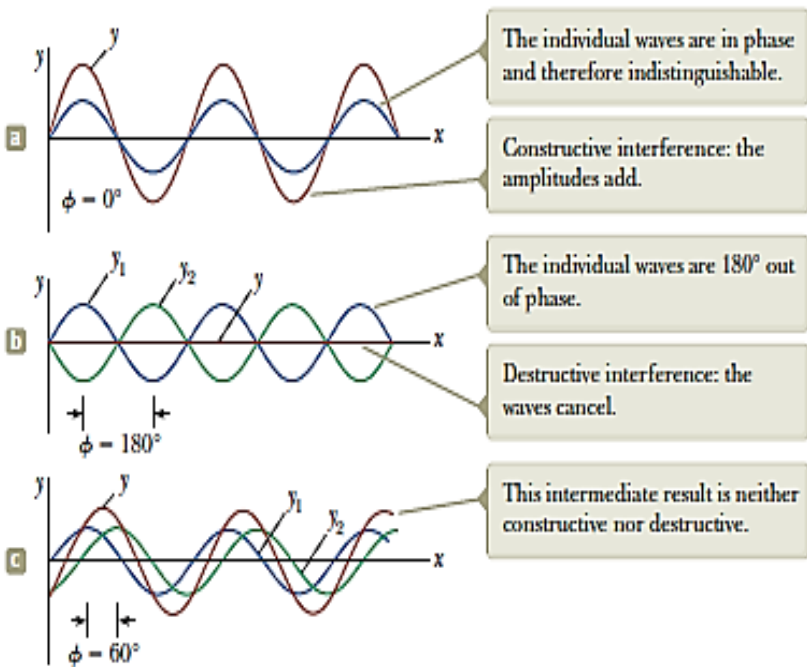
$$I = \frac{P}{S} = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2
 \tag{2.20}$$

Interferensi dan Superposisi Gelombang



Gambar 2.13 Fenomena interferensi gelombang pada air (Sumber : *Interference*, n.d.)

Interferensi gelombang merupakan fenomena yang terjadi ketika dua atau lebih gelombang bertemu dan saling berinteraksi dalam suatu medium yang sama. Interferensi gelombang sering kali menghasilkan pola interferensi yang berulang, seperti pola interferensi cincin dalam interferensi cahaya atau pola interferensi garis-garis dalam interferensi gelombang air. Interferensi gelombang dapat dibagi



Gambar 2.14 Superposisi antara gelombang y_1 (biru) dan y_2 (hijau) menghasilkan resultan gelombang y (merah) (Serway & Jewett, 2014)

menjadi dua jenis utama, antara lain:

Interferensi konstruktif yang terjadi ketika puncak gelombang satu bertemu dengan puncak gelombang lain, atau lembah gelombang satu bertemu dengan lembah gelombang lain, maka amplitudo gelombang-gelombang tersebut akan saling menguatkan sehingga menghasilkan amplitudo yang lebih besar. Contohnya ketika dua gelombang transversal dengan amplitudo yang sama, bertemu dalam fase yang sama (Gambar 2.15a), dimana terjadi tumpang tindih antara gelombang biru (y_1) dan gelombang hijau (y_2), maka gelombang akan saling menguatkan dan menghasilkan amplitudo yang lebih besar (gelombang merah- y) (Serway & Jewett, 2014).

Interferensi destruktif yang terjadi ketika puncak gelombang satu bertemu dengan lembah gelombang lain, atau lembah gelombang satu bertemu dengan puncak gelombang lain. Dalam interferensi destruktif, amplitudo gelombang-gelombang tersebut saling membatalkan sehingga menghasilkan amplitudo yang lebih kecil bahkan nol. Contoh sederhana interferensi destruktif adalah ketika dua gelombang transversal dengan amplitudo yang sama, bertemu dalam fase yang berlawanan di mana $\phi = 180^\circ$ (Gambar 2.15b), ketika puncak gelombang biru (y_1) bertemu dengan lembah gelombang hijau lain (y_2), mereka akan saling membatalkan atau menghilangkan. Sementara, jika $\phi = 60^\circ$ (Gambar 2.15c) tampak amplitudonya hanya mengalami sebagian destruktif (*partially destructively*) sehingga gelombang mengalami penurunan amplitudo gelombang merah (y).

Pola interferensi ini dapat diamati dan dianalisis secara matematis menggunakan prinsip superposisi gelombang dengan menganalisa resultan dari kombinasi gelombangnya secara aljabar, yaitu dengan menjumlahkan nilai fungsi masing-masing individu gelombang (Serway & Jewett, 2014).

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) + \dots + y_n(x, t) = \sum_{i=1}^n y_n(x, t) \quad (2.20)$$

Jika kita tinjau dua gelombang sinusoidal yang berjalan dengan arah yang sama pada sebuah medium linear, di mana keduanya bergerak ke arah kanan dengan frekuensi (f), panjang gelombang (λ), dan amplitudo (A) yang sama, namun fase yang berbeda, maka fungsi individu gelombangnya dapat kita nyatakan sebagai berikut:

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) ; y_2(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

Maka, fungsi gelombang resultan atau hasil superposisinya adalah:

$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \phi)] \quad (2.22)$$

Kita dapat menyederhanakan persamaan (2.22) dengan menggunakan identitas trigonometri berikut:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha - \beta}{2} + \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (2.23)$$

Dengan $\alpha = kx - \omega t$ dan $\beta = kx - \omega t + \phi$, maka:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha - \beta}{2} &= \frac{(kx - \omega t) - (kx - \omega t + \phi)}{2} = \frac{\phi}{2} \\ \frac{\alpha + \beta}{2} &= \frac{(kx - \omega t) + (kx - \omega t + \phi)}{2} = \frac{2(kx - \omega t) + \phi}{2} \\ &= kx - \omega t + \frac{\phi}{2} \end{aligned}$$

Sehingga,

$$y = 2A \left[\cos \left(\frac{\phi}{2} \right) + \sin \left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (2.24)$$

Berdasarkan persamaan (2.24) menunjukkan bahwa fungsi gelombang resultan (y) juga berupa fungsi gelombang sinusoidal yang memiliki frekuensi ($f \rightarrow \omega$) dan panjang gelombang ($\lambda \rightarrow k$) yang sama dengan gelombang individu originalnya. Sehingga amplitudo dari gelombang resultannya adalah $2A \cos \left(\frac{\phi}{2} \right)$, di mana $\frac{\phi}{2}$ adalah konstanta fasenya. Jika konstanta fase ϕ dari gelombang individunya bernilai 0, maka fungsi superposisi gelombang $y = 2A \cos(0) = 2A$, yang menunjukkan interferensi konstruktif dengan amplitudo gelombang superposisi dua kali lebih besar dari amplitudo gelombang individunya (Gambar 2.15a). Umumnya, interferensi konstruktif terjadi jika konstanta fase $\cos \left(\frac{\phi}{2} \right) = \pm 1$, dimana $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots rad$ atau ϕ bernilai genap- π radian. Sementara, jika $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi \dots rad$, atau dengan kata lain ϕ bernilai ganjil- π radian, maka konstanta fase $\cos \left(\frac{\phi}{2} \right) = 0$ yang disebut interferensi destruktif (Gambar 2.15b). Adapun ketika konstanta fase memiliki nilai bebas, selain 0 atau kelipatan integer dari π radian, maka gelombang resultan akan memiliki amplitudo yang nilainya berada di antara 0 dan $2A$ (Gambar 2.15c). (Serway & Jewett, 2014)

Gelombang Berdiri dan Resonansi

Gelombang berdiri adalah jenis gelombang yang terbentuk oleh superposisi dua gelombang yang berjalan dalam arah yang berlawanan dan memiliki amplitudo (A), frekuensi (f), dan panjang gelombang (λ) sama. Secara matematis, kita dapat menganalisisnya melalui penjumlahan dua gelombang sinusoidal di mana y_1 bergerak ke arah kanan, sementara y_2 bergerak ke arah kiri.

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad ; \quad y_2(x, t) = A \sin(kx + \omega t)$$

Maka, fungsi gelombang resultan atau hasil superposisinya adalah:

$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)] \quad (2.26)$$

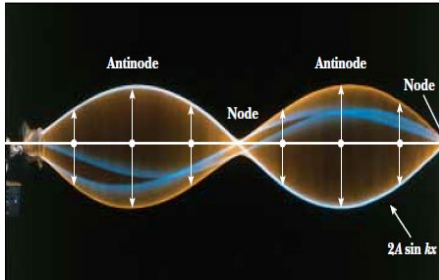
Sederhanakan dengan menggunakan identitas trigonometri berikut:

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

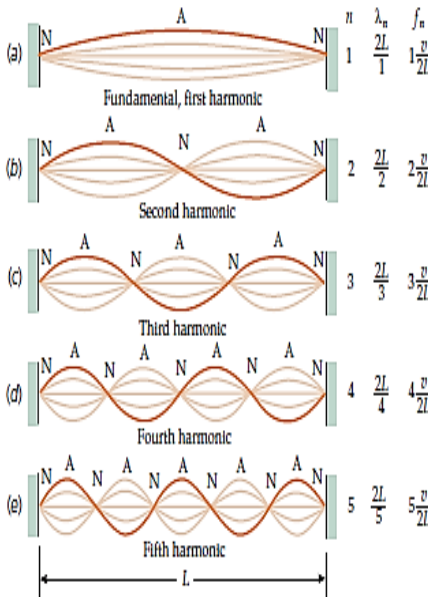
Sehingga, fungsi gelombang berdiri adalah:

$$y = [2A \sin kx] \cos \omega t \quad (2.27)$$

Hal ini menunjukkan pada gelombang berdiri setiap partikel dalam medium bergetar dalam gerakan harmonik sederhana dengan frekuensi yang sama sesuai dengan faktor $\cos \omega t$, dan berosilasi secara vertikal (Gambar.2.16) dalam batasan fungsi amplop $2A \sin kx$ di mana x adalah posisi partikel dalam medium (Halliday et al., 2008).



Gambar 2.15 Gelombang berdiri pada tali (Halliday et al., 2008)



Gambar 2.16 Resonansi frekuensi pada tali (Tipler & Mosca, 2008)

menghasilkan pola gelombang berdiri yang disebut sebagai mode getaran fundamental atau harmonik pertama (f_1). Frekuensi terendah kedua menghasilkan pola (b), di mana mode getaran ini memiliki frekuensi dua kali lipat dari frekuensi fundamental dan disebut sebagai harmonik kedua (f_2). Frekuensi terendah ketiga (c) adalah tiga kali frekuensi fundamental, dan menghasilkan pola harmonik ketiga (f_3), dan seterusnya. Kumpulan semua frekuensi resonansi disebut spektrum frekuensi resonansi dari tali (Tipler & Mosca, 2008).

Misalkan kita tinjau sebuah dawai, ketika sumber digetarkan di salah satu ujung dan merambat ke ujung lainnya, di ujung kedua tersebut gelombang mengalami pemantulan dan merambat dalam arah berlawanan. Saat gelombang bergerak balik ini, ujung pertama masih digetarkan sehingga terjadi interferensi antara gelombang yang terus dihasilkan (y_1) dan gelombang yang dipantulkan (y_2). Dua gelombang tersebut memiliki amplitudo dan frekuensi yang sama namun bergerak dalam arah berlawanan yang superposisinya (y) akan membentuk *node* (N) dan *antinode* (A) yang tetap pada posisi tertentu, sehingga disebut gelombang berdiri (Abdullah, 2017).

Pola-pola frekuensi yang terbentuk pada sistem tali dengan kedua ujung terikat (Gambar 2.17) disebut dengan frekuensi resonansi. Frekuensi resonansi terendah disebut frekuensi fundamental (a) yang

Node (simpul) adalah titik di mana gelombang-gelombang individu akan saling melemahkan satu sama lain, dengan kata lain mengalami interferensi destruktif, sehingga amplitudo gelombang resultan bernilai nol. *Node* terbentuk ketika amplitudonya minimum ($\sin kx = 0$, dimana $kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$) karena $k = 2\pi/\lambda$, maka posisi *node* :

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots, \frac{n\lambda}{2} ; \quad \text{di mana } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.28)$$

Sementara, *antinode* (perut) adalah titik di mana gelombang-gelombang individu akan saling memperkuat amplitudonya atau mengalami interferensi konstruktif, sehingga mencapai nilai maksimum $2A$ ($\sin kx = \pm 1$, dimana $kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$), maka posisi *antinode* : (Serway & Jewett, 2014)

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots, \frac{n\lambda}{4} ; \quad \text{di mana } n = 1, 3, 5 \dots \quad (2.29)$$

Pola *node* dan *antinode* yang terbentuk pada gelombang berdiri ditentukan oleh sifat dan geometri sistem yang digambarkan oleh frekuensi alami sistem. Ketika frekuensi gelombang eksternal yang diberikan ke sistem mendekati frekuensi alami sistem, maka terjadi resonansi (Gambar 2.17). Resonansi merupakan fenomena yang terjadi ketika frekuensi gelombang input cocok dengan frekuensi alami sistem atau mediumnya, sehingga amplitudo gelombang berdiri akan meningkat secara signifikan, karena energi yang diberikan oleh gelombang eksternal diserap secara efisien oleh sistem tersebut. Misalnya, jika frekuensi resonansi suatu sistem getaran pada senar gitar cocok dengan frekuensi fundamental gelombang berdiri pada senar tersebut, maka amplitudo gelombang berdiri akan meningkat secara signifikan dan menghasilkan suara yang lebih keras dan jelas.

Begitupun resonansi pada gempa bumi dapat terjadi dalam berbagai situasi, terutama pada bangunan yang tidak memenuhi standar desain bangunan anti gempa, jembatan, atau struktur lainnya dengan karakteristik tertentu. Ketika gelombang seismik akibat gempa mencapai frekuensi resonansi struktur, energi gelombang tersebut dapat terakumulasi dan meningkatkan



Gambar 2.17 Efek resonansi pada gempa Turki (Tolentino, 2023)

amplitudo getaran pada struktur, sehingga dapat menyebabkan kerusakan yang lebih parah pada struktur seperti yang terjadi pada gempa bumi Turki (Gambar 2.18). Pemahaman tentang gelombang berdiri dan resonansi dapat diaplikasikan dalam menciptakan efek suara, optimasi kinerja struktural, mitigasi gempa dan bencana, serta berbagai aplikasi teknis lainnya.

Daftar Pustaka

- Abdullah, M. (2017). *Fisika Dasar II*. Institut Teknologi Bandung.
- Giancoli, D. C. (2016). *Physics: Principles with Applications* (7th Edition). Pearson Education, Inc.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2008). *Fundamental of Physics, 8th Edition* (8th Edition). John, Wiley & Sons, Inc.
- Interference*. (n.d.). Retrieved June 9, 2023, from https://www.cyberphysics.co.uk/topics/light/A_level/interference.htm
- Khan. (n.d.). *Wave characteristics review (article) _ Khan Academy.html*.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Ninth Edition* (9th Edition). Physics and Astronomy: Charlie Hartford.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (6th Edition). W. H. Freeman and Company.
- Young, H. D., Freedman, R. A., & Ford, A. L. (2012). *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics* (13th Edition). Pearson Education, Inc.

Profil Penulis



Minarti, S.Si., M.T.

Penulis lahir di Palu pada tanggal 27 September 1988. Anak ke 2 dari 4 bersaudara ini merupakan lulusan Sarjana Geofisika di Universitas Hasanuddin Makassar tahun 2010. Ketertarikan penulis terhadap bidang geofisika khususnya sektor energi dan sumber daya mineral memotivasi penulis untuk menggali pengalaman dengan bergabung ke salah satu perusahaan BUMN yang bergerak di bidang industri MIGAS. Kemudian penulis juga telah menyelesaikan studi di jurusan Teknik Geofisika di Institut Teknologi Bandung pada tahun 2017. Saat ini penulis mengabdikan ilmunya sebagai bekal amal jariyah dengan berperan aktif sebagai dosen yang melaksanakan Tridharma Perguruan Tinggi pada Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar yang terletak di Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Mata kuliah yang diajarkan yaitu Fisika Dasar, Statistika Dasar, Pengantar Geofisika, Seismologi, Metode Seismik, Sistem Informasi Geografis, Geofisika Komputasi dan Kapita Selekta. Saat ini penulis juga aktif sebagai editor di Jurnal Fisika dan Terapannya (JFT) dan Jurnal Sains Fisika (SAINFIS) di Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar.

Email Penulis: mingeo14@gmail.com

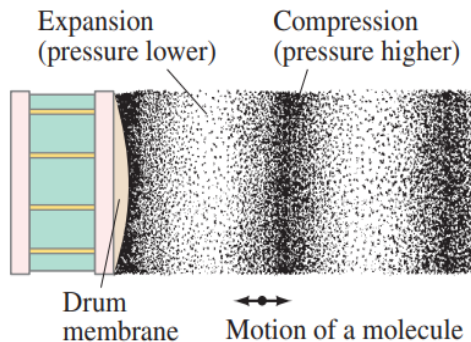
GELOMBANG BUNYI

Kristina Uskenat

Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Merauke

Gerak Gelombang Bunyi

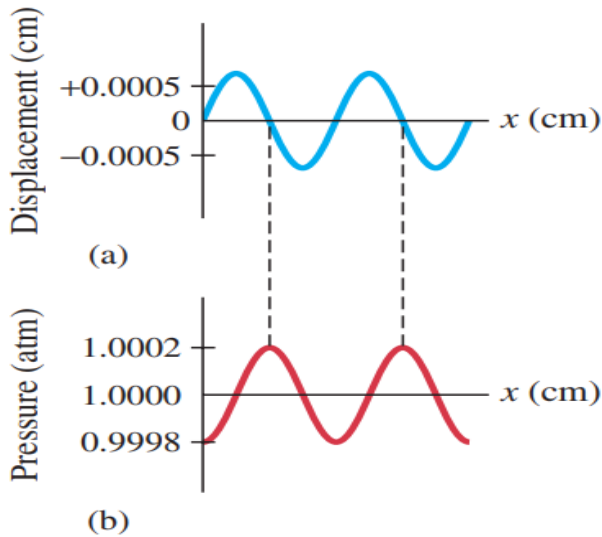
Pada materi sebelumnya kita telah mempelajari tentang gerak gelombang berjalan. Pada bagian ini kita akan membahas tentang gerak pada gelombang bunyi. Dimana kita akan belajar tentang bagaimana suatu tekanan menentukan yang dapat kita dengar. Misalkan gelombang bunyi periodik yang dihasilkan dalam suatu tabung yang mengandung gas dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 3.1 Gelombang bunyi yang merambat dalam tabung gas

Dari gambar terlihat adanya daerah yang berwarna gelap dan daerah yang berwarna lebih terang. Pada daerah yang berwarna gelap terjadi karena gas yang ada dalam tabung dimampatkan sehingga tekanan dan kerapatannya tinggi (**daerah rapatan**). Sedangkan pada daerah yang berwarna lebih terang terjadi karena gas yang berada di dalam tabung mengembang sehingga tekanan dan kerapatannya rendah (**daerah renggangan**). Molekul gas dalam kedua daerah berpindah dengan kelajuan yang sama dengan kelajuan bunyi dalam medium. Saat

molekul gas berosilasi sinusoidal secara berkelanjutan dimana gerak medium sejajar dengan arah perambatan gelombang. Posisi dari gerak molekul relative terhadap posisi kesetimbangan kita simbolkan dengan $s(x, t)$ dan dapat kita lihat pada gambar berikut



Gambar 3.2 Representasi gelombang bunyi dalam ruang pada saat tertentu (a) perpindahan, dan (b) tekanan

Dari gambar (a) posisi suatu molekul gas dapat kita rumuskan sebagai berikut

$$s(x, t) = s_{max} \cos(kx - \omega t)$$

dengan s_{max} posisi maksimum dari molekul gas terhadap titik kesetimbangan/ amplitude perpindahan gelombang (cm), k bilangan gelombang, ω frekuensi sudut (rad/s).

Dari gambar juga terlihat bahwa gelombang simpangan/posisi memiliki beda fase $\frac{1}{4}\lambda$ dari gelombang tekanan. Artinya saat tekanan bernilai maksimum/minimum, simpangan (posisi) dari titik setimbang adalah nol; dan saat simpangan (posisi) bernilai maksimum/minimum variasi tekanan akan bernilai nol.

Perubahan tekanan molekul gas terjadi secara periodic yang dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\Delta P = \Delta P_{max} \sin(kx - \omega t)$$

dengan ΔP_{max} Amplitudo tekanan (cm).

Laju Gelombang Bunyi

Laju gelombang bunyi berbeda pada setiap material yang dilewatinya. Laju gelombang bunyi pada zat padat > zat cair > zat gas. Kelajuan gelombang bunyi tergantung pada kompresibilitas dan kerapatan medium. Kelajuan gelombang bunyi dalam medium ditentukan oleh persamaan

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Dimana v : laju gelombang bunyi, B : modulus bulk dan ρ : kerapatan

Jika dilihat dari pengaruh suhu medium terhadap kelajuan gelombang bunyi maka persamaan yang digunakan adalah $v = (331 + 0,6T)m/s$ dengan T merupakan suhu dalam derajat celcius.

Contoh 3.1 Hitung kelajuan bunyi dalam air jika modulus bulknya $2.1 \times 10^9 N/m^2$ pada suhu $0^\circ C$ dan kerapatan $1.00 \times 10^3 kg/m^3$

Penyelesaian: $v_{air} = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.1 \times 10^9 N/m^2}{1.00 \times 10^3 kg/m^3}} = 1.4 km/s$

Energi Gelombang Bunyi

Energi kinetic dalam gelombang suara dapat ditentukan dengan gerakan setiap ketebalan molekul Δx . Setiap elemen molekul udara memiliki energi kinetik per satuan luas penampang. Berdasarkan gambar 3.1 dapat kita katakan bahwa di dalam piston, terdapat molekul-molekul udara yang membentuk pola regangan dan pola rapatan secara teratur. Pola regangan dan pola rapatan dapat membentuk sebuah grafik sinusoidal simpangan terhadap waktu dengan persamaan $s(x, t) = s_{max} \sin(kx - \omega t)$

$$v = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(s_{max} \sin(kx - \omega t))$$

$$v = \omega s_{max} \cos(kx - \omega t)$$

Besar energi yang diberikan oleh molekul-molekul udara dengan kecepatan getaran kita rumuskan dengan $\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m v^2$

Jika kita substitusikan besar kecepatan getaran dari persamaan 3 maka besar energi yang diperlukan gelombang bunyi adalah

$$E = \pi^2 \rho A \lambda f^2 s_{max}^2$$

Dari persamaan itu dapat kita katakan bahwa **besar energi gelombang bunyi sebanding dengan kuadrat frekuensi dan besar kuadrat amplitude.**

Interferensi Gelombang Bunyi

Interferensi gelombang bunyi merupakan perpaduan dari dua gelombang bunyi atau suara merambat yang memiliki amplitudo dan frekuensi yang sama. Interferensi gelombang bunyi terjadi di ruang. Interferensi gelombang bunyi terdiri dari dua yaitu interferensi konstruktif dan interferensi desktruktif. Interferensi konstruktif terjadi kedua kedua gelombangnya memiliki fase yang sama dengan $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots rad$ dan menghasilkan bunyi atau suara yang keras.

Interferensi destruktif terjadi jika kedua gelombang suara/bunyi 180° di luar fase dengan $\phi = 0, 3\pi, 5\pi, \dots rad$ dan menghasilkan bunyi/suara yang lemah (Serway & John W. Jewett, 2009) (Giancoli, 2005).

Intensitas Dan Taraf Intensitas Gelombang Bunyi

Kekuatan gelombang bunyi dinyatakan dengan banyaknya energi yang dibawa oleh gelombang bunyi. Banyaknya energi yang dibawa oleh sebuah gelombang per satuan waktu melalui satuan luas dinamakan **Intesitas.**

Jika ada sumber bunyi dengan daya sebesar P yang memiliki jarak r maka besarnya intensitas bunyi pada titik tersebut adalah

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

dengan I intensitas gelombang ($Watt/m^2$), P daya yang dibawa gelombang ($Watt, joule/s$), A luas permukaan yang dikenai energi gelombang (m^2), r jarak tempat dari sumber bunyi (m).

Jika ada sumber bunyi pada jarak r_1 dan r_2 maka besar nilai perbandingan nilai intensitas sumber bunyi adalah

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} \right)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{\frac{1}{r_1^2}}{\frac{1}{r_2^2}} \right)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

(Kua, et al., 2021)

Contoh 3.2 Jarak A ke sumber bunyi adalah 3 kali jarak B ke sumber bunyi. Intensitas bunyi yang didengar A dibandingkan dengan intensitas bunyi yang didengar B adalah...

Penyelesaian → jarak sumber bunyi ke titik A, $r_A = 3 \times r_B$. perbandingan intensitas bunyi yang didengar A dengan intensitas bunyi yang didengar B adalah:

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{r_B^2}{r_A^2}$$

$$\frac{I_A}{I_B} = \left(\frac{3 \times r_B}{r_A} \right)^2$$

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{9}{1}$$

Taraf intensitas gelombang bunyi merupakan nilai perbandingan logaritma antara intensitas bunyi yang diukur dengan intensitas ambang batas pendengaran. Intensitas ambang batas pendengaran merupakan intensitas gelombang bunyi paling rendah 10^{-12} W/m^2 dan paling tinggi 1 W/m^2 yang dapat di dengar oleh telinga normal manusia. Secara matematis taraf intensitas gelombang bunyi dirumuskan sebagai berikut

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Dengan TI taraf intensitas (decibel **dB**)¹, I intensitas bunyi dalam $Watt/m^2$ dan I_0 intensitas ambang batas dengan nilai $10^{-12} W/m^2$.

Berikut ini data tabel level bunyi berdasarkan sumber bunyinya

Sumber bunyi	TI (dB)
Di dekat pesawat jet	150
Mesin pasak bumi; senapan mesin	130
Sirene; konser rock	120
Kereta bawah tanah; mesin pemotong rumput	100
Kebisingan lalu lintas	80
Penyedot debu	70
Percakapan biasa	50
Dengungan nyamuk	40
Bisik-bisik	30
Daun yang bergoyang	10
Ambang pendengaran	0

Contoh 3.3 intensitas suara yang dihasilkan lalu lintas dalam keadaan sibuk sekitar $10^{-5} W/m^2$. Berapa taraf intensitas lalu lintas tersebut

¹ Desibel merupakan satuan dari taraf intensitas bunyi, dimana dibentuk dari dua kata yaitu “desi dan bel”. **Bel** berasal dari nama penemu telepon Alexander Graham Bell sedangkan awalan desi- adalah awalan berstandar satuan internasional yang merujuk pada nilai 10^{-1}

Penyelesaian $\rightarrow TI = 10 \log \frac{I}{I_0}$

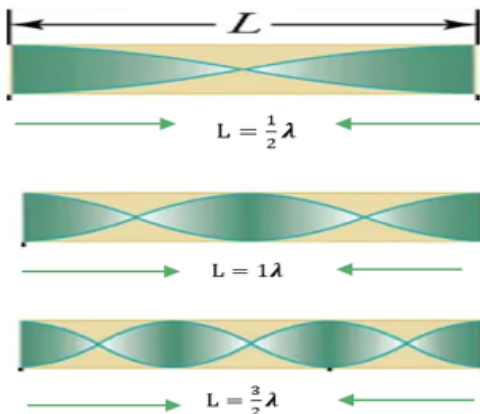
$$TI = 10 \log \left(\frac{10^{-5}}{10^{-12}} \right) = 10 \log (10^7)$$

$$TI = 70 \text{ dB}$$

Pipa Organa

Kolom udara yang berbentuk silinder dinamakan pipa organa. Pipa organa memiliki salah satu ujung terbuka sebagai tempat untuk meniupkan udara. Sedangkan ujung lainnya bisa terbuka maupun tertutup. **Pipa organa terbuka** ditandai dengan kedua ujung pipa terbuka, sedangkan **pipa organa tertutup** ditandai dengan salah satu ujung pipa tertutup (Abdullah, 2017)

Pipa organa Terbuka



Nada dasar $\rightarrow \lambda = 2L$

$$f = \frac{v}{\lambda} \rightarrow f_1 = \frac{v}{2L}$$

Nada atas pertama $\rightarrow \lambda = L$

$$f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$$

Nada atas kedua $\rightarrow \lambda = \frac{2L}{3}$

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3f_1$$

Sumber: <https://openstax.org/books/physics/pages/14-4-sound-interference-and-resonance>

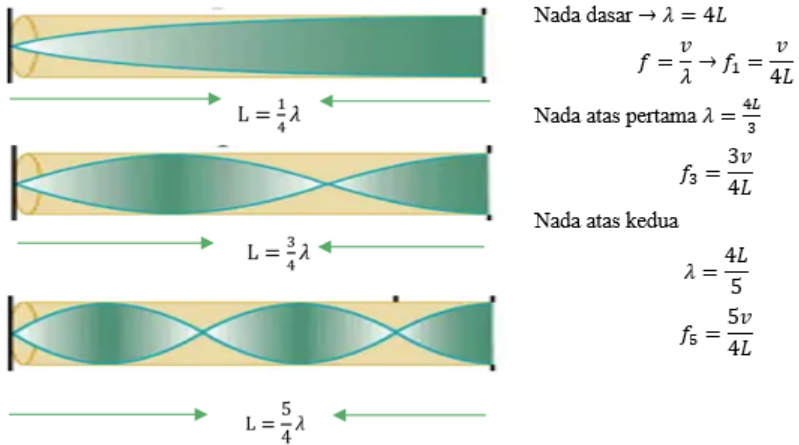
Dari gambar dan persamaan yang di atas, dapat kita simpulkan bahwa frekuensi nada tambahan pada pipa organa terbuka merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi nada dasar

$$f_n = (n + 1) \frac{v}{2L}$$

Dengan f_n frekuensi nada ke-n (Hz), v cepat rambat bunyi dalam pipa (m/s), λ_n Panjang gelombang ke-n (m), L Panjang kolom udara pipa (m).

Pipa Organa Tertutup

Kita dapat menentukan nada-nada pada pipa organa tertutup dengan mengkaji gambar simpangan berikut:



Sumber: <https://openstax.org/books/physics/pages/14-4-sound-interference-and-resonance>

Dari gambar dan persamaan diatas, dapat kita simpulkan bahwa frekuensi nada tambahan pada pipa organa tertutup merupakan hasil kali antara frekuensi nada dasar di kali bilangan ganjil.

$$f_n = (2n + 1) \frac{v}{4L}$$

Dengan f_n frekuensi nada ke-n (Hz), v cepat rambat bunyi dalam pipa (m/s), λ_n Panjang gelombang ke-n (m), L Panjang pipa (m)

Contoh 3.4 Berapa frekuensi dasar dan frekuensi nada atas pertama untuk pipa organa yang panjangnya 26 cm pada 20°C jika pipa tersebut (a) terbuka dan (b) tertutup

Penyelesaian \rightarrow pada 20°C, laju bunyi diudara adalah 343 m/s dan Panjang pipa organa adalah 0,26 m

(a) Untuk pipa terbuka, frekuensi dasar adalah

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{343 \text{ m/s}}{2(0,26 \text{ m})} = 660 \text{ Hz}$$

Frekuensi nada atas pertama adlaah $f_2 = 2f_1 = 2(660 \text{ Hz}) = 1320 \text{ Hz}$

(b) Untuk pipa tertutup, frekuensi dasar adalah

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{343 \text{ m/s}}{4(0,26 \text{ m})} = 330 \text{ Hz}$$

Frekuensi nada atas pertama adalah $f_3 = 3f_1 = 3(330 \text{ Hz}) = 990 \text{ Hz}$

Layangan Bunyi

Jika pada interferensi bunyi terjadi di ruang, maka layangan bunyi merupakan interferensi gelombang terjadi dalam waktu. Layangan bunyi merupakan variasi berkala dalam amplitudo pada titik tertentu akibat dari superposisi (perpaduan/penjumlahan) dua gelombang bunyi yang frekuensinya sedikit berbeda. Sebagai contoh jika dua garpu tala dengan frekuensi yang sedikit berbeda dipukulkan, maka kita akan mendengar suara amplitudo yang berubah secara periodic.

$$f_{\text{layangan}} = |f_1 - f_2|$$

Contoh 3.5 Sebuah garputala bergetar pada frekuensi 438 Hz dan garputala kedua bergetar pada frekuensi 442 Hz, hitunglah besar frekuensi layangan yang terjadi dari kedua garputala tersebut.

Penyelesaian. Dengan menggunakan persamaan $f_{\text{layangan}} = |f_1 - f_2| = |438 \text{ Hz} - 442 \text{ Hz}| = 4 \text{ Hz}$.

Efek Doppler

Efek doppler terjadi karena ada gerak relative antara pendengar dan sumber bunyi. Efek doppler sering kita alami dalam kehidupan sehari-hari. Frekuensi yang didengar oleh pendengar dan frekuensi yang dihasilkan oleh sumber bunyi berbeda. Misalnya sebuah mobil membunyikan klakson dalam keadaan diam dan dalam keadaan mobil bergerak, maka frekuensi yang di dengar oleh pendengar berbeda dengan frekuensi dari klakson mobil yang dihasilkan. Perubahan frekuensi yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$f_p = \left(\frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \right) f_s$$

Dengan f_p frekuensi pendengar (Hz), v cepat rambat bunyi di udara (**nilai:** 340 m/s), v_p kelajuan pendengar (m/s), v_s kelajuan sumber bunyi (m/s) dan f_s frekuensi sumber bunyi (Hz). Nah, bagaimana cara kita menentukan tanda yang digunakan dalam persamaan di atas? Tanda-tanda untuk nilai pada persamaan bergantung pada arah kelajuan dari pengamat dan sumber bunyi.

Ketentuan:

v_p bernilai positif jika pengamat/pendengar mendekati sumber bunyi

v_s bernilai positif jika sumber bunyi menjauhi pengamat/pendengar

v_p bernilai negatif jika pengamat/pendengar menjauhi sumber bunyi

v_s bernilai negative jika sumber bunyi mendekati pengamat/pendengar

Contoh 3.6

Kereta api mendekati kemudian melewati stasiun sambil membunyikan sirine dengan frekuensi 500 Hz. Laju kereta api konstan yaitu 30 m/s. tentukan perubahan frekuensi sirine kereta api yang di dengar oleh orang yang sedang duduk di stasiun jika laju perambatan bunyi 330 m/s.

Penyelesaian. Dari soal kita dapat mengetahui bahwa sumber bunyi (kereta api) mendekati dan menjauhi pendengar (orang yang sedang duduk).

- (1) kita mencari nilai frekuensi yang di dengar oleh pendengar saat sumber bunyi (kereta api mendekati pendengar/pengamat.

$$f_p = \frac{v}{v - v_s} f_s$$
$$f_p = \frac{330 \text{ m/s}}{330 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}} 500 \text{ Hz}$$
$$f_p = \frac{330 \text{ m/s}}{300 \text{ m/s}} 500 \text{ Hz}$$
$$f_p = 550 \text{ Hz}$$

- (2) kita mencari nilai frekuensi yang di dengar oleh pendengar saat sumber bunyi menjauhi pendengar/pengamat

$$f_p = \frac{v}{v + v_s} f_s$$
$$f_p = \frac{330 \text{ m/s}}{330 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}} 500 \text{ Hz}$$
$$f_p = \frac{330 \text{ m/s}}{360 \text{ m/s}} 500 \text{ Hz}$$
$$f_p = 458 \text{ Hz}$$

Daftar Pustaka

- Abdullah, M. (2017). *Fisika Dasar II*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Giancoli, D. C. (2005). *Physics: Principkes with Applications* (6 ed.). New Jersey: Pearson Education.
- Kua, M. Y., Maing, C. M., Tabun, Y. F., Jibril, A., Setiawan, J., Sukiastini, I. G., . . . Dolo, F. X. (2021). *Teori dan Aplikasi Fisika Dasar*. (S. Haryati, Ed.) Aceh: Yayasan Penerbit Muhammad Zaini.
- Serway, R. A., & John W. Jewett, J. (2009). *Fisika untuk Sains dan Teknik* (6 ed.). (Maryati, Ed.) Jakarta, Indonesia: Salemba Teknika.

Profil Penulis



Kristina Uskenat, M.Pd

Penulis merupakan salah salah dosen Pendidikan fisika di Universitas Musamus Merauke. Ketertarikan penulis terhadap fisika di mulai pada saat penulis berada pada jenjang Pendidikan sekolah dasar. Karena hal tersebut penulis melanjutkan studi ke jenjang Pendidikan menengah atas dengan mengambil jurusan IPA dan lulus pada tahun 2012. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan studi ke jenjang Pendidikan tinggi dan menyelesaikan studi S1 pada tahun 2016 di program studi Pendidikan fisika Universitas Katolik Widya Mandira Kupang. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan studi S2 di program studi magister Pendidikan fisika Universitas Negeri Jakarta dan lulus pada tahun 2019. Pada tahun 2020 penulis memulai karir sebagai dosen pada Perguruan Tinggi Swasta Universitas San Pedro Kupang hingga awal tahun 2022.

Penulis aktif melakukan kegiatan penelitian pada bidang media pembelajaran dan model pembelajaran. Selain kegiatan penelitian penulis juga melakukan kegiatan pengabdian. Sejauh ini, kegiatan pengabdian yang dilakukan penulis berupa pelatihan microlearning dengan menggunakan powtoon dalam pembelajaran di sekolah.

Email Penulis: kristinauskenat@unmus.ac.id

MUATAN DAN MEDAN LISTRIK

Gusti Ayu Rai Tirta

SMK Bintang Persada Denpasar, Bali – Indonesia

Pendahuluan

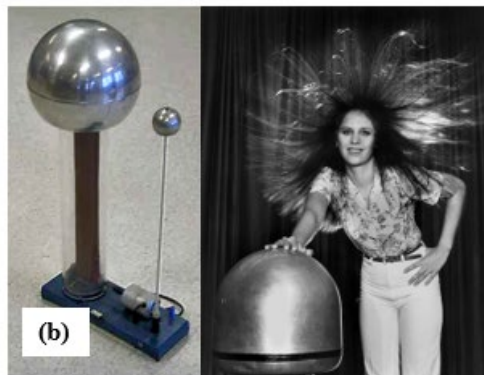
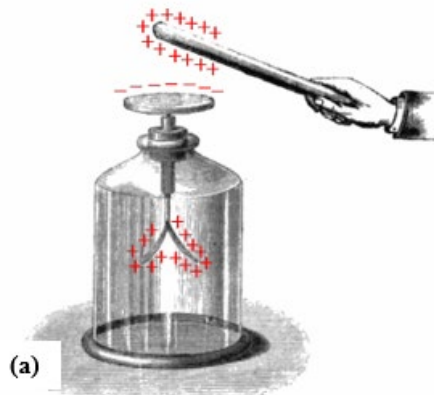
Alam semesta ini terbentuk karena adanya sistem kelistrikan. Sistem kelistrikan alam semesta dihasilkan oleh muatan listrik. Percikan muatan-muatan listrik yang bergerak dipercepat akibat perbedaan potensial mampu menghasilkan radiasi gelombang elektromagnetik yang kita amati sebagai cahaya tampak (*visible light*) beserta spektrum lainnya yang bersifat tak tampak (*invisible*). Fenomena alam yang dihasilkan oleh sistem kelistrikan alam semesta bersifat makroskopik. Kita mengamati fenomena sambaran petir, radiasi bintang, serta berbagai fenomena semesta seperti aurora adalah hasil dari sistem kelistrikan alam semesta. Begitu pula dalam skala mikroskopik, makhluk hidup dan makhluk tak hidup yang menempati alam semesta ini memiliki sistem kelistrikan. Makhluk hidup mampu hidup karena memiliki sistem saraf yang merupakan sistem kelistrikan yang bersifat mikroskopik. Sistem saraf mengatur seluruh aktivitas sel, jaringan, organ, maupun sistem organ dalam tubuh sehingga makhluk hidup mampu bernafas, melihat, bergerak, dan beraktivitas secara umum. Akibat adanya sistem kelistrikan tersebut, makhluk hidup mampu bertumbuh dan berkembang biak. Sementara itu, makhluk tak hidup juga memiliki sistem kelistrikan mikroskopik. Contohnya adalah udara yang tersusun atas molekul-molekul gas memiliki sistem kelistrikan internal. Molekul-molekul gas tersebut mengandung muatan sehingga mampu menghasilkan energi listrik pada skala tertentu. Energi listrik ini dapat ditransfer dari satu lokasi ke lokasi lainnya yang mengalami perbedaan potensial, seperti fenomena petir yang dapat diamati dalam kehidupan sehari-hari (Gambar 4.1).

Petir terjadi sebagai akibat perbedaan potensial antara lapisan awan (*cloud*) di udara dengan Bumi. Perbedaan potensial yang sangat besar, yaitu sekitar 10 – 100 juta volt menyebabkan terjadi percikan muatan yang sangat cepat dalam waktu sekitar 30 milisekon ke permukaan Bumi. Percikan muatan tersebut ke Bumi menghasilkan arus listrik sebesar 30 kA dan transfer energi sebesar 105 Joule/m². Transfer energi tersebut menghasilkan panas pada ujung sambaran petir mencapai 30.000 °C (Augustyn, 2023). Sistem kelistrikan mikroskopik yang disebabkan oleh perbedaan konsentrasi muatan listrik pada molekul-molekul udara yang terkungkung dalam awan adalah penyebab utama timbulnya petir.



Gambar 4.1 Petir yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari merupakan hasil dari sistem kelistrikan alam semesta yang dimunculkan oleh benda tak hidup (a). Fenomena ini terjadi akibat perbedaan konsentrasi muatan listrik pada lapisan atmosfer dan permukaan bumi sehingga menyebabkan beda potensial sangat besar dan memicu percikan muatan (b) (Augustyn, 2023).

Berdasarkan penjelasan fenomena tersebut maka konsep kelistrikan menjadi sangat penting untuk dipelajari dan dipahami. Secara umum, konsep kelistrikan dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu kelistrikan statik dan kelistrikan dinamis. Kelistrikan statik mempelajari berbagai fenomena kelistrikan yang diakibatkan oleh interaksi muatan-muatan dalam kondisi statik (diam). Dalam konteks ini, setiap muatan dipandang mampu berinteraksi dengan muatan lainnya secara statik. Interaksi tersebut dapat berupa gaya tarik atau gaya tolak. Interaksi antar muatan akan menimbulkan berbagai fenomena kelistrikan statik, seperti adanya pengimbasan muatan (*charges induction*) dari satu benda ke benda lainnya (Gambar 4.2a dan 4.2b) dan fenomena triboelektrik pada dua material isolator yang saling kontak (Gambar 4.3).



Gambar 4.2 Fenomena pengimbasan muatan pada elektroskop (a) (Thompson, 1881) dan pengimbasan muatan dari kepala generator Van de Graaff ke rambut model sehingga antara helai rambut saling tolak-menolak (b) (Hoffman, 1982).



Gambar 4.3 Efek triboelektrik menyebabkan muatan elektrostatis menumpuk di bulu karena gerakan kucing. Medan listrik dari muatan tersebut menyebabkan polarisasi molekul sterofom karena induksi elektrostatis sehingga dihasilkan gaya tarik kecil terhadap potongan-potongan sterofom ke bulu-bulu kucing (McGrath, 2006).

Kelistrikan dinamik mempelajari efek dinamika muatan listrik. Dalam konteks ini, muatan listrik ditinjau dalam keadaan bergerak sebagai akibat adanya perbedaan potensial. Muatan listrik bergerak dari potensial tinggi ke potensial rendah. Muatan listrik yang bergerak setiap satuan waktu akan menghasilkan arus listrik. Aplikasi konsep kelistrikan dinamik dapat ditemui dalam kehidupan sehari-hari dengan adanya sistem rangkaian listrik. Berbagai piranti elektronik menggunakan rangkaian listrik untuk mampu mengalirkan muatan dari sumber muatan ke berbagai komponen elektronik lainnya. Adanya rangkaian listrik mampu mengaktifkan piranti-piranti elektronika sehingga dapat bekerja sesuai fungsinya, seperti radio dapat menghasilkan suara, televisi mampu menampilkan gambar dan menghasilkan suara, serta kipas angin mampu bergerak untuk mengalirkan udara dari suatu titik ke titik alir lainnya.

Kita tidak dapat memungkiri bahwa konsep kelistrikan sangat penting untuk dipahami karena hampir seluruh aktivitas kita berkaitan dengan listrik dan sistem kelistrikan. Dengan demikian, bab ini akan secara khusus menyajikan pembahasan terkait konsep kelistrikan statik, yaitu muatan dan medan listrik. Pembahasan konsep muatan dan medan listrik disertai dengan ilustrasi dan simulasi sehingga mudah dipahami dan menarik untuk dibaca. Oleh karena itu, setelah mempelajari bab ini, pembaca diharapkan mampu menjelaskan konsep muatan dan medan listrik baik untuk muatan titik maupun muatan-muatan yang

terdistribusi kontinu dalam sebuah benda rigid. Pembaca juga diharapkan mampu menjelaskan hukum Coulomb, melakukan perhitungan medan listrik yang dihasilkan oleh muatan titik maupun benda rigid yang bermuatan, melakukan perhitungan gaya listrik (gaya Coulomb) sebagai akibat interaksi dua atau lebih muatan-muatan, dan menjelaskan konsep dipole.

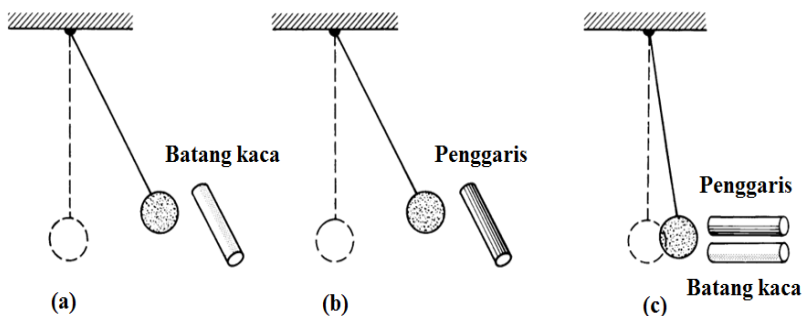
Muatan Listrik

Sifat kelistrikan yang dimiliki oleh sebuah benda tidak terlepas dari muatan listriknya. Muatan listrik tersebut terdistribusi baik pada permukaan benda maupun pada partikel-partikel terkecil penyusun benda itu. Coba bayangkan tetesan air. Satu tetes air murni mengandung muatan-muatan yang terdistribusi secara merata akan tetapi total muatan listrik air murni adalah nol. Begitu pula dengan plastik, logam, kayu, serta berbagai contoh benda lainnya juga mengandung muatan-muatan yang terdistribusi merata. Contoh lain yang lebih riil adalah sisir dan rambut. Kita tentu pernah bahkan selalu menggunakan sisir untuk merapikan tatanan rambut. Apa yang akan terjadi seandainya sisir yang baru selesai kita pakai untuk merapikan rambut tiba-tiba didekatkan ke permukaan potongan-potongan kecil kertas seperti Gambar 4.3? Kita dapat mengamati fenomena yang mengejutkan yaitu potongan kertas akan menempel pada permukaan sisir. Dengan demikian, terjadi interaksi tarik-menarik antara potongan kertas dan permukaan sisir. Interaksi tarik-menarik tersebut dikarenakan adanya gaya tarik-menarik yang muncul akibat sifat kelistrikan yang baru dimiliki oleh sisir plastik setelah dipakai menyisir rambut.



Gambar 4.3 Potongan-potongan kertas menempel pada permukaan sisir yang telah dipakai menyisir rambut.

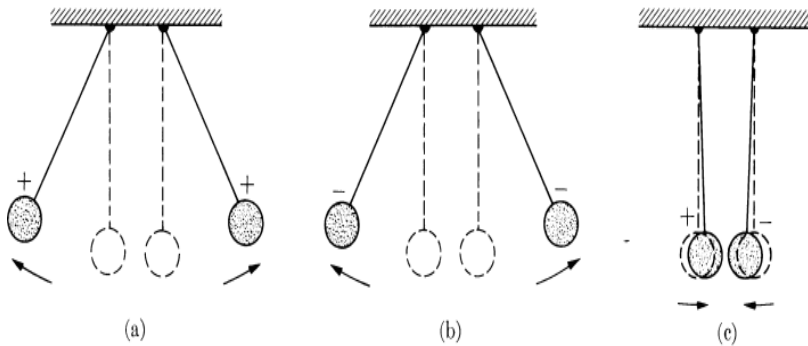
Sekarang mari kita perhatikan contoh lain. Sebatang kaca yang telah digosok (*rubbed*) dengan selembar kain sutra (*silk*) didekatkan ke sebuah bola sterofom yang digantung seperti Gambar 4.4a. Saat batang kaca didekatkan ke bola maka bola akan menyimpang (tertarik) menuju batang kaca. Begitu pula jika batang kaca diganti dengan batang penggaris plastik yang juga telah digosok dengan kain sutra lalu didekatkan ke bola, maka bola ini juga akan bergerak menyimpang mendekati penggaris (Gambar 4.4b). Selanjutnya, saat kedua batang tersebut didekatkan satu sama lain lalu didekatkan ke bola, maka bola hanya mengalami penyimpangan kecil, bahkan dalam kondisi tertentu tidak mengalami penyimpangan (Gambar 4.4c). Hasil percobaan ini menjelaskan bahwa interaksi antara batang kaca dan bola sterofom serta batang penggaris dan bola mengalami proses fisika yang berbeda. Jenis muatan yang dominan terjadi setelah batang kaca maupun penggaris digosok dengan kain sutra adalah berbeda. Fakta ini didukung dari hasil percobaan terakhir, yaitu interaksi kedua batang terhadap bola justru sangat lemah.



Gambar 4.4 Batang kaca didekatkan ke bola sterofom (a); batang penggaris didekatkan ke bola (b); kedua batang didekatkan ke bola secara bersamaan (c) (Alonso dan Finn, 1967).

Dalam rangka mengetahui proses fisika yang terjadi pada fenomena tersebut, maka digunakan dua buah bola sterofom (Gambar 4.5). Batang kaca yang telah digosok menggunakan kain sutra masing-masing didekatkan ke setiap permukaan bola. Setelah itu, kedua bola akan saling bertolakan (Gambar 4.5a). Begitu selanjutnya, setelah masing-masing bola didekati menggunakan sebatang penggaris yang telah digosok kain sutra, setelah itu keduanya akan saling tolak-menolak (Gambar 4.5b). Akan tetapi, setelah salah satu bola didekati menggunakan batang kaca dan bola lainnya didekati menggunakan batang penggaris, maka keduanya justru saling tarik-menarik (Gambar 4.5c). Dengan demikian, terdapat dua jenis muatan listrik yang berbeda

terdistribusi dominan pada bola hasil dari proses pengimbasan menggunakan batang kaca maupun batang penggaris. Jenis muatan tersebut oleh Benjamin Franklin (Fisikawan Amerika pada abad ke-18) dinamai dengan muatan listrik positif (*positive charge*) dan muatan listrik negatif (*negative charge*).



Gambar 4.5 Interaksi kelistrikan antara dua buah benda bermuatan (Alonso dan Finn, 1967).

Apabila dua buah benda bermuatan listrik sama (positif-positif atau negatif-negatif) saling didekatkan maka kedua benda akan mengalami interaksi tolak-menolak. Sebaliknya, apabila muatan listrik kedua benda adalah berbeda, maka kedua benda akan saling tarik-menarik saat didekatkan. Bola styrofoam awalnya bermuatan listrik netral. Artinya, jumlah muatan listrik positif dan negatif yang terdistribusi pada permukaannya adalah sama. Begitu pula kondisi yang sama dialami oleh batang kaca dan batang penggaris. Setelah batang kaca digosok menggunakan kain sutera, batang kaca menjadi bermuatan listrik positif karena jumlah muatan listrik negatif yang terdistribusi pada permukaan batang kaca lebih kecil dibandingkan jumlah muatan listrik positif akibat terjadinya transfer muatan listrik negatif batang kaca ke permukaan kain sutera. Ketika batang kaca didekatkan ke permukaan bola styrofoam, maka saat itu terjadi pengimbasan muatan listrik negatif dari permukaan bola dekat permukaan gelas kaca dan muatan listrik positif pada permukaan gelas kaca. Akhirnya, kedua bola menjadi bermuatan positif sehingga mengalami interaksi tolak-menolak satu terhadap lainnya (Gambar 4.5a). Kondisi sebaliknya terjadi akibat pengimbasan batang penggaris ke permukaan bola. Bola menjadi bermuatan negatif sehingga keduanya juga saling tolak-menolak (Gambar 4.5b).

Muatan listrik adalah sebuah besaran fisika yang disimbolkan dengan huruf q . Satuan muatan adalah Coulomb (C), dimana $1\text{ C} = (1\text{ A})(1\text{ s})$

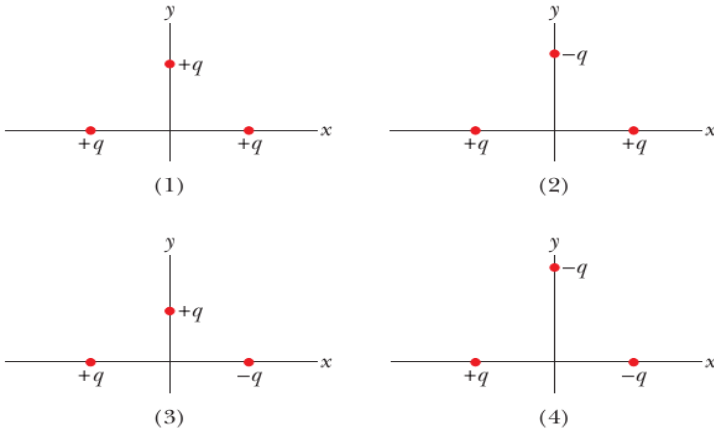
(Ampere sekon). Zarah terkecil muatan listrik positif disebut dengan proton ($+q$) atau ($+e$) dan zarah terkecil muatan listrik negatif disebut dengan elektron ($-q$) atau umumnya ditulis dengan notasi ($-e$). Kedua zarah tersebut terdapat di dalam atom. Muatan elektron adalah $1 (-e) = -1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb dan muatan proton adalah $1 (+e) = 1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb. Keduanya memiliki nilai muatan yang sama tetapi tanda berbeda. Apabila benda memiliki jumlah elektron lebih besar dibandingkan jumlah proton (*excess of negative charge*) maka benda dinyatakan bermuatan negatif. Sebaliknya, jika jumlah elektronnya lebih kecil daripada jumlah proton maka benda dinyatakan bermuatan positif (*minus of negative charge*).

Elektron pada sebuah benda bersifat dinamik. Elektron dapat bergerak bebas sehingga dinyatakan sebagai elektron bebas (*free charge*). Ada pula elektron yang terikat kuat dengan inti atom sehingga disebut sebagai elektron terikat (*bounded electron*). Jumlah elektron bebas yang dimiliki oleh sebuah benda menentukan karakteristik kelistrikan benda tersebut. Benda yang memiliki elektron bebas dalam jumlah yang besar akan bersifat konduktif sehingga disebut sebagai konduktor. Contoh konduktor yaitu logam emas, besi, tembaga, air keran, cairan tubuh manusia, cairan NaCl maupun KCl. Sementara itu, benda yang memiliki jumlah elektron bebas sangat kecil akan bersifat nonkonduktif sehingga disebut isolator. Contoh isolator yaitu gelas, plastik, kayu, kertas, air murni, serta karet. Selain konduktor dan isolator, terdapat juga semikonduktor dan superkonduktor. Semikonduktor adalah benda yang bersifat semikonduktif yaitu jumlah elektron bebasnya lebih besar dari isolator dan lebih kecil dari konduktor. Contoh semikonduktor adalah logam aluminium, kadmium, gallium, indium, metaloid silikon, boron, serta germanium. Selanjutnya, superkonduktor adalah benda yang superkonduktif. Sifat konduktifnya jauh lebih tinggi daripada konduktor, sehingga jumlah elektron bebas yang dimiliki superkonduktor jauh lebih besar dibandingkan konduktor. Contoh superkonduktor adalah selenium, niobium, beryllium, osmium, serta molybdenum pada kondisi tekanan tinggi.

Dalam skala mikroskopik, muatan listrik dapat dipandang sebagai benda titik (*charge particle*), yaitu benda yang bersifat tunggal (1 elektron atau 1 proton). Kumpulan muatan akan membentuk kuantisasi muatan (misal 2 elektron, 3 elektron, atau 3 proton). Oleh karena itu, muatan memiliki sifat terkuantisasi,

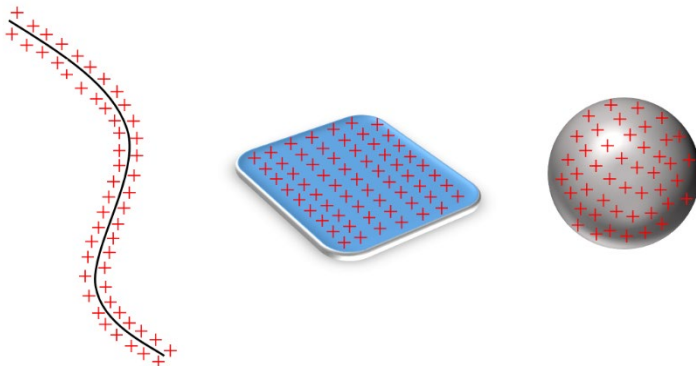
$$q = ne \dots\dots\dots 4.1)$$

dimana $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Misalnya, sebuah partikel memiliki muatan $q = -6e$ yang artinya partikel itu bermuatan negatif dengan besar muatannya adalah enam kali nilai muatan elektron. Partikel-partikel bermuatan yang terdistribusi secara diskrit akan saling berinteraksi satu dengan yang lain, seperti diilustrasikan oleh Gambar 4.6.



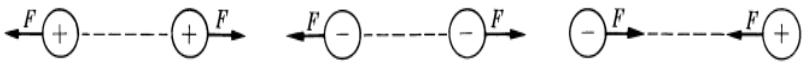
Gambar 4.6 Ilustrasi distribusi diskrit partikel-partikel bermuatan (Halliday, Resnick, Walker, 2015).

Dalam skala makroskopik, muatan listrik sebuah benda rigid terdistribusi secara kontinu, baik untuk benda yang bersifat linear satu dimensi, benda dua dimensi, maupun benda tiga dimensi (Gambar 4.7). Total muatan yang dimiliki benda rigid dapat dinyatakan dengan notasi Q .



Gambar 4.7 Ilustrasi distribusi muatan pada benda rigid satu dimensi, dua dimensi, dan tiga dimensi.

Elektron dan proton saling tarik-menarik. Sementara elektron dan elektron maupun proton dan proton saling tolak-menolak. Interaksi tarik-menarik maupun tolak-menolak antara dua partikel bermuatan dikuantisasikan dalam bentuk gaya tarik-menarik maupun gaya tolak-menolak (Gambar 4.8). Gaya adalah besaran vektor. Oleh karena itu, besarnya tarikan atau tolakan yang dialami oleh masing-masing partikel bermuatan dinyatakan dengan nilai atau magnitudo gaya tarik atau gaya tolak yang bekerja padanya. Arah gaya tarikan atau gaya tolakan yang bekerja pada kedua partikel bermuatan yang saling berinteraksi adalah saling berlawanan. Gaya inilah yang menyebabkan kedua bola sterofoam saling tarik-menarik atau tolak-menolak seperti diilustrasikan oleh Gambar 4.5.



Gambar 4.8 Gaya tarik-menarik dan gaya tolak-menolak yang bekerja pada setiap partikel bermuatan yang saling berinteraksi.

Hukum Coulomb

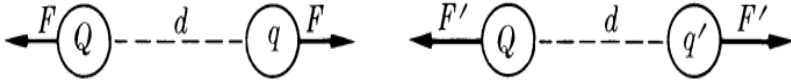
Pada subbab 4.2 telah dijelaskan secara detail tentang konsep muatan. Muatan titik – muatan titik yang sejenis akan mengalami interaksi tolak-menolak dan muatan titik – muatan titik yang berbeda jenis akan mengalami interaksi tarik-menarik. Gaya tolak menolak atau gaya tarik-menarik yang bekerja pada setiap muatan titik (seperti diilustrasikan oleh Gambar 4.8 yang saling berinteraksi memiliki nilai yang sama besar. Partikel-partikel bermuatan yang memiliki nilai muatan berbeda akan mengalami besar gaya yang berbeda seperti diilustrasikan oleh Gambar 4.9. Secara matematis hubungan kesetaraan ini dapat diungkapkan dengan persamaan 4.2,

$$\frac{q}{q'} = \frac{|\vec{F}|}{|\vec{F}'|} \dots\dots\dots 4.2)$$

Begitu pula dengan jarak pisah kedua muatan, apabila kedua muatan berpisah dengan jarak *d* yang lebih besar maka besarnya gaya tarik-menarik atau tolak-menolak yang dialami muatan justru semakin kecil. Secara matematis hubungan ini dapat diungkapkan dengan persamaan 4.3,

$$\frac{|\vec{F}|}{|\vec{F}'|} = \left(\frac{d'}{d}\right)^n \dots\dots\dots 4.3)$$

dimana n menyatakan pangkat d terhadap \vec{F} .



Gambar 4.9 Ilustrasi pengaruh nilai muatan terhadap besar gaya yang dihasilkan dari hasil interaksi muatan-muatan tersebut (Alonso dan Finn, 1967).

Secara eksperimen, seorang ahli keteknikan Francis yaitu Charles A. De Coulomb (1736 – 1860) telah menguji hubungan antara nilai muatan q , jarak pisah muatan d terhadap besarnya gaya tarik-menarik atau gaya tolak-menolak \vec{F} . Coulomb menggunakan timbangan torsi Cavendish (Gambar 4.10) pada eksperimen itu. Hasilnya, Coulomb membuktikan bahwa besarnya gaya elektrostatis (gaya tarik-menarik atau gaya tolak-menolak) yang terjadi sebagai akibat interaksi dua buah muatan adalah sebanding dengan hasil kali nilai kedua muatan serta berbanding terbalik terhadap kuadrat jarak pisah kedua muatan. Berdasarkan persamaan 4.3, maka nilai $n = 2$, jadi hubungan ini dapat diungkapkan secara matematis dengan persamaan 4.4,

$$|\vec{F}| \propto \frac{q_1 q_2}{r^2} \dots\dots\dots 4.4)$$

dimana r menyatakan jarak pisah antara kedua muatan (ingat bahwa $r = d$). Berdasarkan hasil eksperimen, Coulomb menjelaskan bahwa apabila dua buah muatan yang sama berada dalam ruang vakum dengan jarak pisah satu meter, maka pada setiap muatan akan bekerja gaya tolak sebesar $8,9874 \times 10^9 \text{ N}$ ($\approx 9,0 \times 10^9 \text{ N}$). Dengan demikian, nilai ini dapat digunakan sebagai konstanta kesebandingan untuk persamaan 4.4, yaitu

$$|\vec{F}| = (9,0 \times 10^9) \frac{q_1 q_2}{r^2} \dots\dots\dots 4.5)$$

dimana $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

Persamaan 4.5 hanya berlaku khusus untuk interaksi muatan-muatan di dalam ruang hampa dengan permitivitas

$$\epsilon_o = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,854 \times 10^{-12} \text{ N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^2 . \text{ Secara umum, gaya}$$

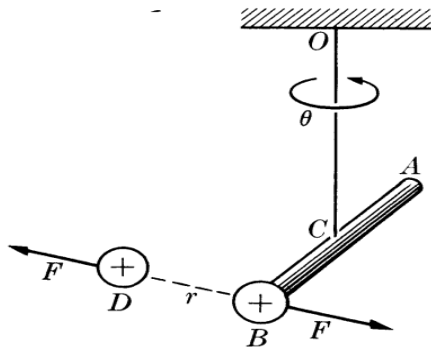
elektrostatik yang dihasilkan dari interaksi dua muatan q_1 dan q_2 dapat diungkapkan dengan persamaan 4.6,

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \dots\dots\dots 4.6)$$

dimana $\epsilon = \epsilon_o \epsilon_r$ dan \hat{r} adalah vektor satuan radial arah gaya \vec{F} . Besaran ϵ menyatakan permitivitas total tempat terjadinya interaksi kedua muatan dan ϵ_r menyatakan permitivitas relatif yang disebut juga sebagai konstanta dielektrik medium. Ruang hampa tentu memiliki nilai $\epsilon_r = 1$. Konstanta dielektrik beberapa medium dapat disajikan pada Tabel 4.1.

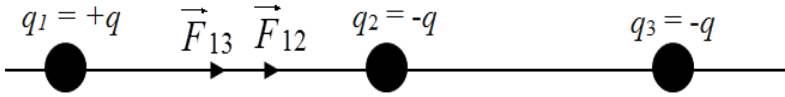
Tabel 4.1 Konstanta dielektrik beberapa jenis medium (Kim, dkk., 2008)

Medium	Konstanta dielektrik ϵ_r
Udara	1 (0,85 – 1,21 pada 20°C)
Air	80 (79,50 – 80,24 pada 20°C)
Es	3 (pada -5°C)
Batuan basalt	12
Batuan granit	7 – 9
Batu pasir (<i>sandstone</i>)	9 – 11
Pasir kering	2,5 – 3,5 (pada 20°C)
Cairan etanol	15,21 (pada 20°C)
Aseton	21,20 (pada 20°C)



Gambar 4.10 Timbangan torsi cavendish untuk eksperimen gaya elektrostatik (Alonso dan Finn, 1967).

Gaya elektrostatis yang bekerja pada sebuah muatan akibat pengaruh interaksi dari muatan-muatan lain di sekitarnya memenuhi sifat superposisi, yaitu penjumlahan vektor gaya setiap interaksi muatan dengan muatan lainnya. Sebagai contoh, perhatikan interaksi muatan-muatan pada Gambar 4.11,

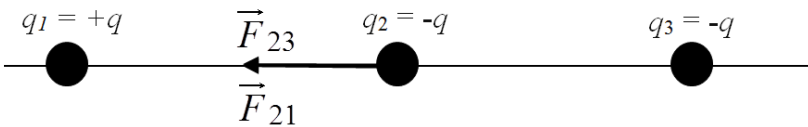


Gambar 4.11 Ilustrasi sifat superposisi gaya elektrostatis.

Berdasarkan Gambar 4.11, gaya \vec{F}_{12} dan \vec{F}_{13} masing-masing menyatakan gaya yang bekerja pada muatan q_1 akibat pengaruh muatan q_2 dan q_3 . Gaya elektrostatis yang terjadi antara muatan q_1 dan q_2 adalah gaya tarik-menarik. Begitu pula, gaya elektrostatis yang terjadi antara muatan q_1 dan q_3 . Muatan q_1 dalam hal ini menjadi tempat pengukuran gaya elektrostatis. Dengan demikian, pada muatan q_1 gaya-gaya elektrostatis yang bekerja memiliki arah keluar muatan q_1 secara radial menuju muatan q_2 dan q_3 . Secara matematis, total gaya elektrostatis yang bekerja pada muatan q_1 dapat diungkapkan dengan persamaan 4.7,

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} \dots\dots\dots 4.7)$$

Persamaan 4.7 adalah ungkapan matematis sifat superposisi yang dimiliki oleh gaya elektrostatis. Apabila muatan q_2 dianggap sebagai muatan acuan tempat pengukuran, maka arah vektor gaya-gaya elektrostatis yang bekerja dapat digambarkan melalui Gambar 4.12,



Gambar 4.12 Ilustrasi gaya-gaya elektrostatis yang bekerja pada muatan q_2 .

Berdasarkan Gambar 4.12, interaksi tarik-menarik terjadi antara muatan q_2 dan q_1 dengan gaya \vec{F}_{21} . Interaksi tolak-menolak terjadi antara muatan q_2 dan q_3 dengan gaya \vec{F}_{23} . Total gaya yang bekerja adalah

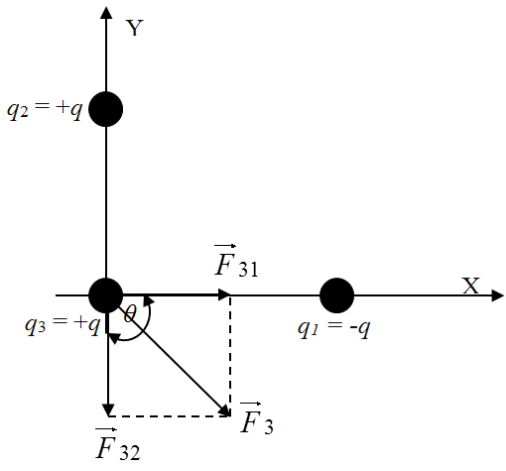
$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} \dots\dots\dots 4.8)$$

Dengan demikian, apabila terdapat sejumlah n muatan di sekitar muatan acuan (misalnya muatan q_1), maka prinsip superposisi gaya-gaya elektrostatik tersebut dapat diungkapkan dengan persamaan umum 4.9,

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15} + \vec{F}_{16} + \dots + \vec{F}_{1n} \dots\dots\dots 4.9)$$

Jadi, prinsip superposisi adalah penjumlahan gaya-gaya elektrostatik yang dihasilkan oleh setiap interaksi antara muatan acuan (muatan tempat pengukuran) dan sebuah muatan lain di sekitarnya.

Bagaimana cara menentukan resultan gaya (*net electrostatic force*) dari muatan-muatan yang berinteraksi tidak dalam satu garis kerja? Perhatikan Gambar 4.13. Terdapat tiga buah muatan $q_1 = -q$, $q_2 = +q$, dan $q_3 = +q$ yang terletak masing-masing pada sumbu X, sumbu Y dan di pusat koordinat kartisius dengan jarak pisah muatan yang saling berdekatan adalah r . Gaya - gaya elektrostatik yang bekerja pada muatan q_3 dapat ditentukan dengan terlebih dahulu menggambarkan gaya elektrostatik yang dihasilkan dari interaksi antara muatan q_3 dan q_1 serta muatan q_3 dan q_2 .



Gambar 4.13 Ilustrasi gaya-gaya elektrostatik yang bekerja pada muatan q_3 .

Gaya \vec{F}_{31} dan \vec{F}_{32} tidak berada pada satu garis kerja. Secara vektor, hubungan kedua gaya tersebut dengan \vec{F}_3 dapat diungkapkan dengan persamaan 4.10,

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32} \dots\dots\dots 4.10)$$

Besarnya (disebut juga magnitudo) gaya \vec{F}_3 dapat dihitung dengan persamaan 4.11,

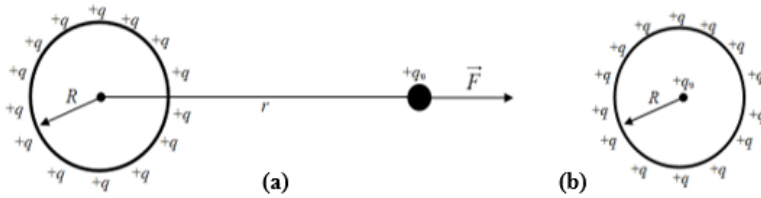
$$|\vec{F}_3| = \sqrt{|\vec{F}_{31}|^2 + |\vec{F}_{32}|^2 + 2|\vec{F}_{31}||\vec{F}_{32}|\cos\theta} \dots\dots\dots 4.11)$$

dimana θ menyatakan besar sudut apit antara gaya \vec{F}_{31} dan \vec{F}_{32} . Dalam kasus ini $\theta = \pi/2$, sehingga nilai $\cos\theta = 0$. Persamaan 4.11 dapat disederhanakan menjadi persamaan 4.12,

$$|\vec{F}_3| = \sqrt{|\vec{F}_{31}|^2 + |\vec{F}_{32}|^2} \dots\dots\dots 4.12)$$

Bagaimana cara menghitung besarnya gaya elektrostatis yang bekerja pada sebuah muatan titik q akibat interaksinya dengan sebuah kulit bola dengan muatan-muatan yang terdistribusi merata dipermukaan kulitnya? Dalam rangka menyelesaikan kasus ini, maka perhatikan Gambar 4.14. Kondisi pertama adalah sebuah muatan titik q_u berada pada jarak r di luar kulit bola yang berjari-jari R (Gambar 4.14a). Untuk kondisi ini, kita dapat menganggap bahwa muatan-muatan yang terdistribusi merata di permukaan kulit bola terkonsentrasi pada pusat massanya (di pusat kulit bola). Dengan demikian, kulit bola ini dapat dianggap sebagai muatan titik dengan besar muatan $Q = nq$. Interaksi antara muatan-muatan kulit bola dengan muatan titik q_u yang terletak di luar kulit bola akan seolah-olah menjadi interaksi yang sederhana layaknya interaksi tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua buah muatan titik. Total gaya elektrostatis yang bekerja pada q_u dapat dihitung menggunakan persamaan 4.13,

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_u Q}{r^2} \hat{r} \dots\dots\dots 4.13)$$



Gambar 4.14 Interaksi antara muatan q_u yang terletak di luar kulit bola dengan muatan total Q (a) dan di dalam kulit bola (b).

Kondisi kedua adalah sebuah muatan titik q_u berada di dalam kulit bola (Gambar 4.14b). Kondisi ini tentu menghasilkan resultan gaya elektrostik sama dengan nol. Secara fisis, muatan q_u akan mengalami gaya elektrostik yang dipengaruhi oleh setiap muatan titik pada permukaan kulit bola. Gaya-gaya elektrostik tersebut saling meniadakan satu dengan yang lain karena efek simetri sehingga resultan gayanya menjadi nol.

Medan Listrik Oleh Partikel Bermuatan

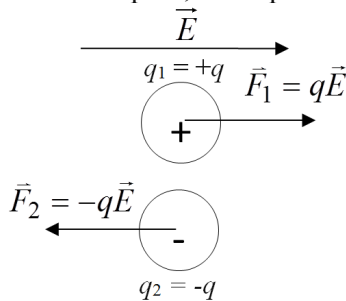
Pada subbab 4.3 telah dibahas secara detail tentang gaya elektrostik yang dialami oleh muatan-muatan yang saling berinteraksi secara statik. Apa penyebab timbulnya gaya elektrostik itu? Apabila hanya terdapat sebuah muatan dalam suatu ruang apakah muatan itu akan mengalami gaya elektrostik? Kedua pertanyaan ini sangatlah penting untuk dijawab untuk dapat menjelaskan fenomena kelistrikan yang dialami oleh partikel-partikel bermuatan.

Secara alamiah, setiap partikel bermuatan menghasilkan medan listrik statis \vec{E} yang nilainya sebanding dengan besar muatan itu sendiri. Semakin besar muatan dari sebuah partikel, maka semakin besar pula medan listrik statik yang dihasilkan di sekitar muatan itu. Jadi, sebuah muatan akan memberikan gaya tarikan atau gaya tolakan kepada muatan lain apabila muatan lain itu masih berada di sekitar muatan utama itu sendiri. Dalam konteks ini, kita akan menggunakan istilah muatan sumber dan muatan uji. Muatan sumber (q_s) adalah muatan utama yang kita anggap memberikan gaya tarikan atau gaya tolakan kepada muatan lain di sekitarnya. Muatan uji (q_u) adalah muatan lain yang dianggap menerima pengaruh gaya tarikan atau gaya tolakan dari muatan utama (q_s). Muatan uji pada umumnya disepakati merupakan muatan positif. Sebagai contoh, perhatikan Gambar 4.14. Kulit bola bermuatan dapat dianggap sebagai muatan sumber (q_s) dan muatan q_u yang berada pada jarak r dari pusat bola dapat dianggap sebagai muatan

uji. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa medan listrik \vec{E} adalah daerah di sekitar muatan sumber yang masih terpengaruh gaya elektrostatik \vec{F} yang dikerjakan oleh muatan sumber kepada muatan uji di sekitarnya. Secara matematis, hubungan \vec{E} dan \vec{F} dapat diungkapkan dengan persamaan 4.14,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_s} \text{ atau } \vec{F} = q_s \vec{E} \dots\dots\dots 4.14)$$

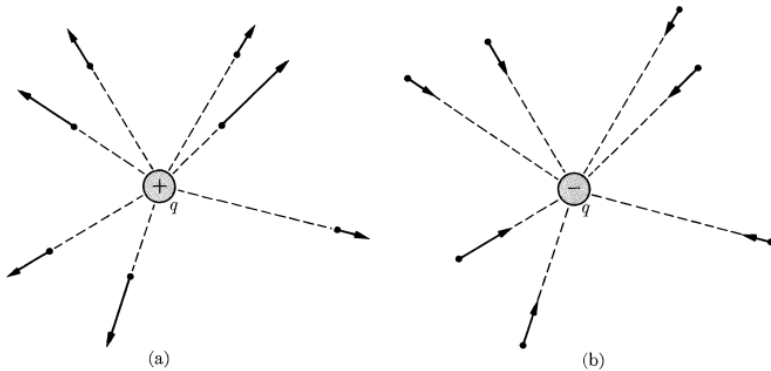
dimana satuan medan listrik \vec{E} adalah N/C. Berdasarkan persamaan 4.14, gaya elektrostatik yang dikerjakan pada sebuah muatan listrik positif searah dengan medan listrik yang bekerja padanya. Sementara itu, arah gaya elektrostatik pada sebuah muatan negatif akan berlawanan arah medan listrik yang bekerja padanya. Untuk memudahkan memahami konsep ini, maka perhatikan Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Ilustrasi medan listrik yang bekerja pada sebuah partikel bermuatan.

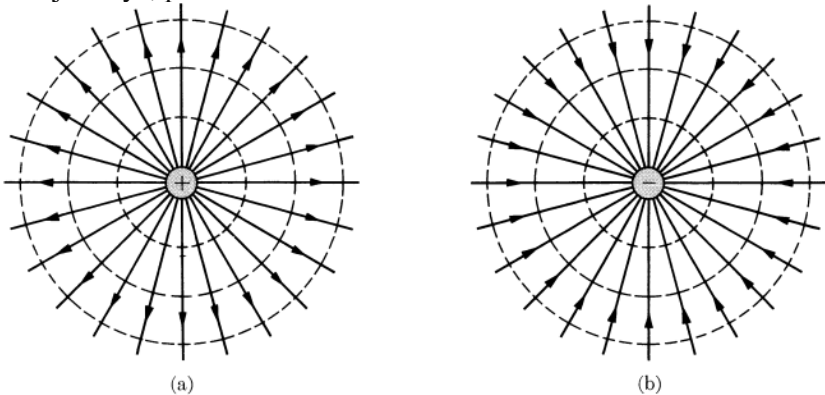
Apabila medan listrik yang bekerja pada sebuah muatan uji q_u adalah nol maka tidak akan bekerja gaya elektrostatik pada muatan uji itu yang diberikan oleh muatan sumber q_s . Ketiadaan muatan sumber akan menyebabkan ketiadaan gaya elektrostatik pada muatan uji.

Berdasarkan Gambar 4.15, kita dapat menyimpulkan bahwa medan listrik yang dihasilkan oleh muatan positif bersifat divergen. Sementara itu, medan listrik yang dihasilkan oleh muatan negatif bersifat konvergen. Sifat medan listrik tersebut dapat diilustrasikan dengan Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Ilustrasi arah medan listrik yang dihasilkan oleh partikel bermuatan positif (a) dan partikel bermuatan negatif (b) (Alonso dan Finn, 1967).

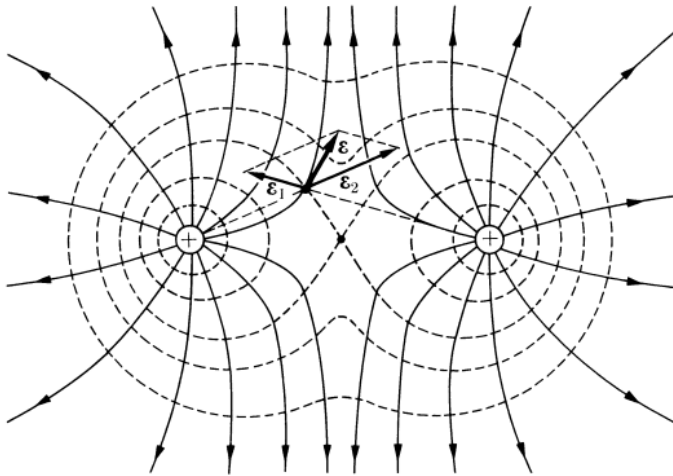
Apabila beberapa muatan uji q_u yang identik diletakkan pada jarak yang sama dari muatan sumber q_s maka seluruh muatan uji q_u akan mengalami medan listrik yang besarnya sama. Hal ini dikarenakan muatan uji q_u berada pada daerah yang bersifat equipotensial. Untuk lebih jelasnya, perhatikan Gambar 4.17.



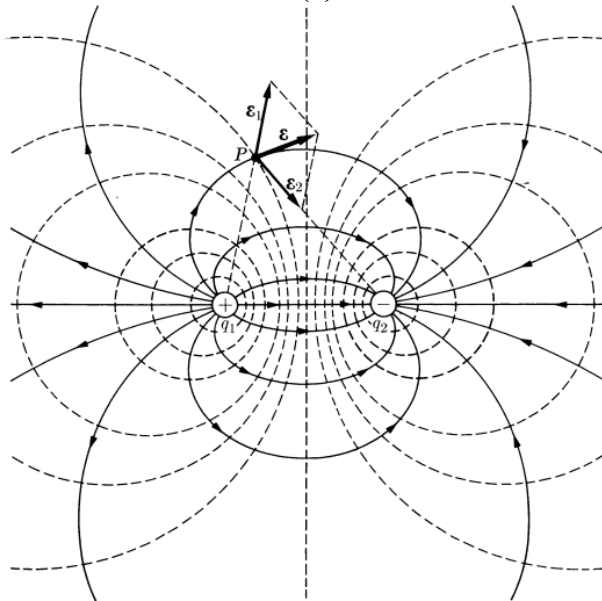
Gambar 4.17 Ilustrasi permukaan equipotensial dari muatan sumber yang memiliki besar medan listrik sama pada setiap titik posisi di permukaannya baik untuk muatan positif (a) dan negatif (b). Garis-garis melingkar putus-putus merupakan permukaan equipotensial (Alonso dan Finn, 1967).

Bagaimana interaksi medan listrik yang dihasilkan oleh dua muatan yang saling berinteraksi? Perhatikan Gambar 4.18 untuk memudahkan pemahaman kita tentang interaksi medan dua muatan. Jika dua muatan sejenis saling berinteraksi maka interaksi medan listrik yang dihasilkan pada sebuah titik dimana muatan uji berada dapat diilustrasikan seperti Gambar 4.18a. Begitu juga interaksi medan listrik yang dihasilkan oleh

dua muatan berbeda jenis pada sebuah titik muatan uji dapat diilustrasikan seperti Gambar 4.18b.



(a)



(b)

Gambar 4.18 Ilustrasi bentuk interaksi medan listrik yang dihasilkan dua muatan sumber pada sebuah muatan uji di titik P (Alonso dan Finn, 1967).

Medan listrik \vec{E} yang dialami oleh muatan uji q_u pada titik P merupakan resultan dari medan listrik \vec{E}_1 dan \vec{E}_2 yang dihasilkan oleh

muatan sumber q_1 dan q_2 . Secara matematis, vektor medan listrik \vec{E}_1 dan \vec{E}_2 dapat diungkapkan dengan persamaan 4.15 dan 4.16,

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_{u1}}{q_u} = \frac{1}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r} \frac{q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 \dots\dots\dots 4.15)$$

$$\vec{E}_2 = \frac{\vec{F}_{u2}}{q_u} = \frac{1}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r} \frac{q_2}{r_2^2} \hat{r}_2 \dots\dots\dots 4.16)$$

dimana $\epsilon_r = 1$ untuk udara (Tabel 4.1). Besar medan listrik \vec{E}_1 dan \vec{E}_2 adalah

$$|\vec{E}_1| = \frac{1}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r} \frac{q_1}{r_1^2} \dots\dots\dots 4.17)$$

$$|\vec{E}_2| = \frac{1}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r} \frac{q_2}{r_2^2} \dots\dots\dots 4.18)$$

Vektor medan listrik \vec{E} dapat diungkapkan dengan persamaan 4.19,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \dots\dots\dots 4.19)$$

Persamaan ini sangat mirip dengan persamaan 4.10. Dengan demikian, medan listrik \vec{E} memenuhi sifat superposisi layaknya gaya elektrostatik. Persamaan umum superposisi medan listrik \vec{E} adalah

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n = \sum_i^n \vec{E}_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r} \sum_i^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i \dots\dots\dots 4.20)$$

Apabila kondisinya seperti Gambar 4.18, maka besar medan listrik \vec{E} yang dialami oleh muatan uji q_u adalah

$$|\vec{E}| = \sqrt{|\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2|\vec{E}_1||\vec{E}_2|\cos\theta} \dots\dots\dots 4.21)$$

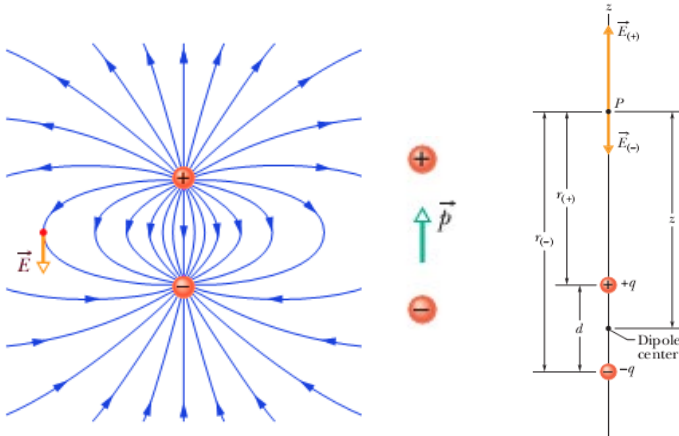
dimana θ menyatakan besar sudut apit antara medan \vec{E}_1 dan \vec{E}_2 .

Medan Listrik Oleh Dipole

Pada subbab 4.4 kita telah membahas secara detail medan listrik yang dihasilkan oleh sebuah muatan titik atau partikel bermuatan. Lantas, bagaimana medan listrik yang dihasilkan oleh pasangan muatan titik yang berbeda jenis tetapi besar muatan sama q (dipole)? Gambar 4.18b adalah konfigurasi yang kita maksudkan sebagai sebuah dipole. Sebuah dipole memiliki momen dipole

$$|\vec{p}| = qd \dots\dots\dots 4.22)$$

dimana d adalah jarak pisah antara muatan q . Vektor dipole memiliki arah dari muatan negatif ke positif. Untuk kasus yang lebih sederhana, kita kembali perhatikan sebuah dipole seperti Gambar 4.19. Asumsikan interaksi terjadi di udara.



Gambar 4.19 Ilustrasi medan listrik yang terjadi di sekitar dipole (titik P) dan ilustrasi momen dipole (Halliday dkk., 2015).

Misalkan sebuah muatan uji q_u diletakkan pada titik P yang berada pada jarak $r(+)$ dari muatan positif dan $r(-)$ dari muatan negatif. Titik P ini juga terletak pada jarak r dari pusat dipole (Gambar 4.20). Medan listrik yang dihasilkan oleh masing-masing muatan pada posisi muatan uji q_u adalah $\vec{E}_{(+)}$ dan $\vec{E}_{(-)}$. Medan listrik total yang dialami oleh muatan q_u adalah

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_{(+)}| - |\vec{E}_{(-)}| \dots\dots\dots 4.23)$$

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \frac{q}{r_{(+)}^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \frac{q}{r_{(-)}^2}$$

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \frac{q}{\left(z - \frac{1}{2}d\right)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \frac{q}{\left(z + \frac{1}{2}d\right)^2}$$

$$|\vec{E}| = \frac{q}{4\pi\epsilon_o z^2} \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{d}{2z}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{d}{2z}\right)^2} \right)$$

$$|\vec{E}| = \frac{q}{4\pi\epsilon_o z^2} \frac{2d/z}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2}$$

$$|\vec{E}| = \frac{q}{2\pi\epsilon_o z^3} \frac{d}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2}$$

Asumsikan $z \gg d$ dan $d/2z \ll 1$, maka

$$|\vec{E}| = \frac{q}{2\pi\epsilon_o z^3} d = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \frac{qd}{z^3}$$

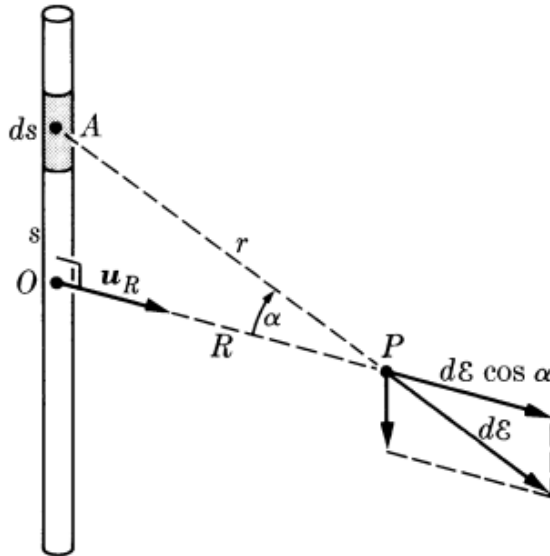
Gunakan persamaan 4.22, sehingga kita peroleh

$$|\vec{E}| = \frac{q}{2\pi\epsilon_o z^3} d = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \frac{|\vec{p}|}{z^3} \dots\dots\dots 4.24)$$

Persamaan 4.24 mengungkapkan besar medan listrik yang dialami oleh muatan uji q_u akibat dipole listrik. Semakin kecil jarak pusat dipole ke muatan uji maka semakin besar medan listrik yang dihasilkan.

Medan Listrik Oleh Benda Rigid Bermuatan

Benda rigid memiliki distribusi muatan listrik yang bersifat kontinu. Benda rigid dapat berupa untaian kawat, lempengan logam, serta bola pejal seperti bola besi. Pada subbab ini secara khusus dibahas tentang medan listrik yang dihasilkan oleh benda rigid berupa kawat. Misalnya diberikan sebuah kawat lurus yang sangat panjang s dengan kerapatan muatan per satuan panjang kawat adalah λ . Sebuah muatan uji q_u pada posisi P yang berjarak R dari kawat (Gambar 4.20).



Gambar 4.20 Ilustrasi vektor medan listrik yang bekerja pada muatan uji di titik P (Alonso dan Finn, 1967).

Muatan q_u akan memperoleh pengaruh medan listrik yang dihasilkan oleh setiap elemen kawat. Misalkan elemen kawat yang kita tinjau memiliki panjang ds . Elemen ini memiliki jarak r ke titik P. Elemen kawat ini menghasilkan medan listrik $d\vec{E}$. Medan listrik ini memiliki komponen vektor $d\vec{E}_+$ dan $d\vec{E}_{//}$, dimana

$$|d\vec{E}_+| = |d\vec{E}| \cos \alpha \dots\dots\dots 4.25)$$

$$|d\vec{E}_{//}| = |d\vec{E}| \sin \alpha \dots\dots\dots 4.26)$$

Apabila garis OP menjadi sumbu batang yang melalui pusat massa batang dan posisinya tegak lurus batang, maka total medan listrik yang dihasilkan sejajar batang adalah nol. Hal ini karena efek simetri. Elemen batang di atas titik O akan menghasilkan medan listrik yang memiliki komponen sejajar batang mengarah ke bawah. Sementara itu, elemen batang yang berada di bawah titik O justru menghasilkan medan listrik yang memiliki komponen sejajar batang mengarah ke atas. Oleh karena itulah, komponen medan listrik tersebut saling meniadakan. Disisi lain, komponen medan listrik arah tegak lurus batang yang dihasilkan seluruh elemen batang saling menguatkan ke atas keluar batang. Dengan demikian, medan listrik total yang dialami oleh muatan uji q_u adalah medan listrik total dari komponen arah tegak lurus batang.

Besar komponen medan listrik arah tegak lurus batang dapat diungkapkan dengan persamaan 4.27 (asumsi batang dan muatan uji berada di udara),

$$\left| d\vec{E}_+ \right| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \cos\alpha \dots\dots\dots 4.27)$$

dimana $dq = \lambda ds$. Persamaan 4.27 dapat dinyatakan kembali menjadi

$$\left| d\vec{E}_+ \right| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda ds}{r^2} \cos\alpha \dots\dots\dots 4.28)$$

Medan listrik total yang dialami muatan uji q_u adalah

$$\left| \vec{E} \right| = \int \left| d\vec{E}_+ \right| = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{ds}{r^2} \cos\alpha \dots\dots\dots 4.29)$$

Berdasarkan Gambar 4.20, maka $r = R \sec \alpha$ dan $s = R \tan \alpha$, sehingga

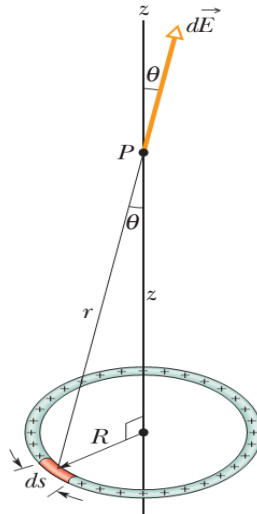
$$ds = R \sec^2 \alpha d\alpha \dots\dots\dots 4.30)$$

dimana nilai $\alpha = 0 \rightarrow \pi/2$. Persamaan 4.29 akan menjadi

$$\left| \vec{E} \right| = \int \left| d\vec{E}_+ \right| = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 R} \int_{\alpha=0}^{\pi/2} \cos\alpha d\alpha \dots\dots\dots 4.31)$$

$$\left| \vec{E} \right| = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R} \dots\dots\dots 4.32)$$

Konsep yang sama dapat kita gunakan untuk menganalisis besar medan listrik yang dialami oleh sebuah muatan uji yang terletak di atas sebuah kawat melingkar berbentuk cincin pada jarak z dari pusat kawat (Gambar 4.21). Misalkan kawat melingkar ini memiliki jari-jari R dan kerapatan muatan per satuan panjang kawat λ . Apabila panjang kawat adalah s maka panjang elemen kawat yang akan digunakan sebagai sampel adalah ds . Panjang kawat s juga merupakan keliling lingkaran yang mampu dibentuk oleh kawat ini. Medan listrik yang dihasilkan oleh setiap elemen kawat bekerja pada muatan uji q_u . Medan listrik ini memiliki komponen tegak lurus garis sumbu kawat $d\vec{E}_\perp$ dan komponen sejajar sumbu kawat $d\vec{E}_\parallel$. Pada kasus ini, komponen medan listrik yang tegak lurus sumbu kawat juga saling meniadakan karena efek simetri, sehingga hanya komponen yang sejajar sumbu kawat saja yang mempengaruhi muatan uji q_u .



Gambar 4.21 Ilustrasi medan listrik yang terjadi pada muatan uji di titik P akibat kawat melingkar bermuatan (Halliday dkk., 2015).

Pada kasus ini, kita mengetahui bahwa nilai r dan θ memenuhi

$$r = \sqrt{R^2 + z^2} \dots\dots\dots 4.33)$$

$$\cos \theta = \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \dots\dots\dots 4.34)$$

Gunakan persamaan 4.29 untuk menghitung medan listrik total, yaitu

$$\begin{aligned}
 |\vec{E}| &= \int |d\vec{E}_+| = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{ds}{r^2} \cos\theta \\
 |\vec{E}| &= \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{ds}{(R^2 + z^2)} \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \\
 |\vec{E}| &= \frac{\lambda z}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}} \int ds \dots\dots\dots 4.35)
 \end{aligned}$$

Syarat batas ds adalah $0 \rightarrow 2\pi R$, sehingga

$$\begin{aligned}
 |\vec{E}| &= \frac{\lambda z}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}} \int_{s=0}^{2\pi R} ds \\
 |\vec{E}| &= \frac{\lambda z (2\pi R)}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}} \dots\dots\dots 4.36)
 \end{aligned}$$

Apabila muatan total kawat melingkar adalah q , maka kerapatan kawat memenuhi

$$\lambda = \frac{q}{2\pi R} \dots\dots\dots 4.37)$$

Persamaan 4.36 dapat direformulasi menjadi

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qz}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \dots\dots\dots 4.38)$$

Apabila muatan uji q_u diletakkan pada jarak yang sangat jauh ($z \gg R$), maka medan listrik yang dialami muatan uji menjadi

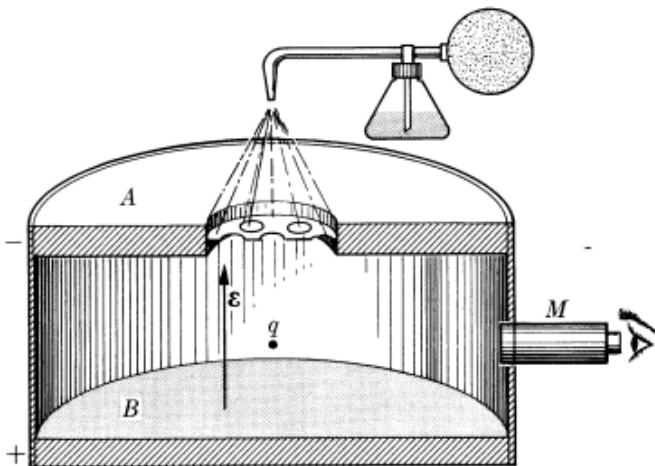
$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{z^2} \dots\dots\dots 4.39)$$

Persamaan ini merepresentasikan bahwa kawat melingkar seolah-olah berperan sebagai muatan titik q terhadap muatan uji q_u .

Muatan Titik Dalam Medan Listrik

Ketika sebuah partikel bermuatan q berada dalam pengaruh medan listrik \vec{E} maka pada muatan itu akan dikerjakan gaya elektrostatis \vec{F} . Besar gaya elektrostatis ini sebanding dengan hasil kali muatan q dengan besar medan listrik \vec{E} , seperti diungkapkan dengan persamaan 4.14. Arah gaya \vec{F} bergantung pada jenis muatan listrik itu. Muatan listrik negatif akan mengalami gaya elektrostatis yang arahnya berlawanan terhadap arah medan listrik yang bekerja. Sebaliknya, muatan positif akan mengalami gaya elektrostatis searah dengan arah medan listrik (diilustrasikan dengan Gambar 4.15).

Fenomena muatan listrik dalam medan listrik dapat kita temui pada instrumen tetes minyak Millikan. Robert A. Millikan (1910 – 1913) telah melakukan eksperimen untuk mengukur besar muatan elementer e . Millikan menggunakan instrumen seperti ditunjukkan dengan Gambar 4.22. Dua buah pelat penutup dihubungkan dengan beda potensial tertentu sehingga menyebabkan timbulnya medan listrik \vec{E} dari pelat bawah ke atas. Pada saat itu, minyak diteteskan ke dalam camber menggunakan semprotan seperti tampak pada Gambar. Pergerakan tetes minyak diamati melalui mikroskop M. Minyak dalam konteks ini mengandung muatan listrik. Oleh karena itu, gerakan tetes minyak akan dipengaruhi oleh medan listrik yang bekerja antara kedua pelat.



Gambar 4.22 Sketsa instrumen tetes minyak Millikan (Alonso dan Finn, 1967).

Asumsikan jenis muatan listrik minyak adalah q (muatan positif). Setiap tetes minyak memiliki massa m . Tetesan minyak memiliki jari-jari r dan kerapatan ρ . Ketika minyak ditetaskan, maka tetesan minyak ini akan jatuh menuju ke permukaan dalam pelat bawah. Tetesan minyak akan terkena pengaruh medan gravitasi Bumi sebesar g . Selain itu, tetesan minyak juga akan mengalami gesekan dengan fluida di dalam camber yang memiliki koefisien viskositas η . Dengan demikian, saat beda potensial antara pelat penutup camber adalah nol, maka berlaku persamaan gerak tetesan minyak, yaitu

$$mg - 6\pi\eta r v_1 = ma \dots\dots\dots 4.40)$$

dimana v_1 adalah kecepatan gerak tetes minyak saat $|\vec{E}| = 0 \text{ N/C}$. Apabila minyak tidak dalam keadaan dipercepat ($a = 0 \text{ m/s}^2$), maka saat ini minyak dinyatakan memiliki kecepatan terminal yang besarnya adalah

$$v_1 = \frac{mg}{6\pi\eta r} \dots\dots\dots 4.41)$$

atau

$$v_1 = \frac{2\rho r^2 g}{9\eta} \dots\dots\dots 4.42)$$

dimana $m = \frac{4}{3}\pi\rho r^3$.

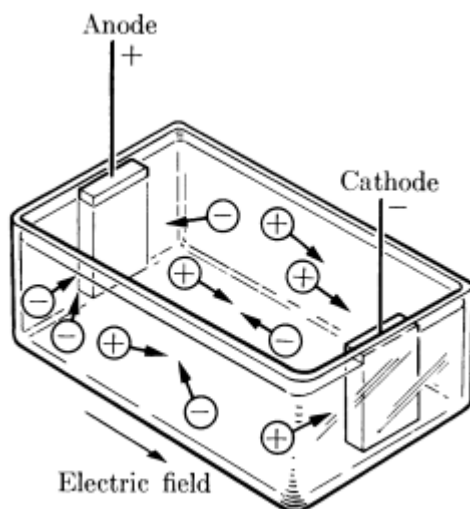
Apabila medan listrik \vec{E} bekerja pada camber, maka persamaan gerak tetes minyak menjadi,

$$q|\vec{E}| - mg - 6\pi\eta r v_2 = ma \dots\dots\dots 4.43)$$

Kecepatan terminal tetes minyak bernilai

$$v_2 = \frac{q|\vec{E}| - mg}{6\pi\eta r} \dots\dots\dots 4.44)$$

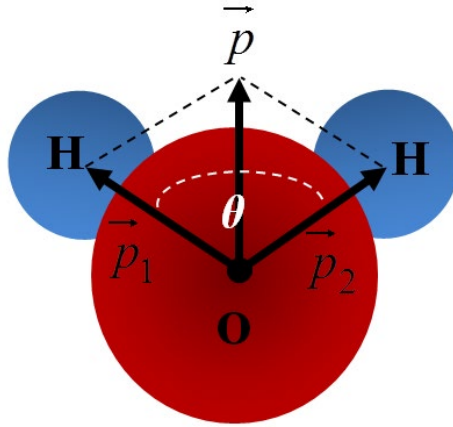
Selain instrumen tetes minyak Millikan, fenomena terkait partikel bermuatan dalam medan listrik juga terjadi pada sel elektrolisis (Gambar 4.22). Larutan yang bersifat elektrolit mengandung ion-ion positif maupun negatif. Ketika kedua elektrode sel diberikan beda potensial, maka di dalam sel ini akan bekerja medan listrik dari elektrode positif (anode) ke elektrode negatif (katode). Ion-ion di dalam sel akan mengalami polarisasi. Ion-ion positif akan bergerak dari anode ke katode, sebaliknya ion-ion negatif akan bergerak dari katode ke anode.



Gambar 4.23 Sketsa instrumen elektrolisis (Alonso dan Finn, 1967).

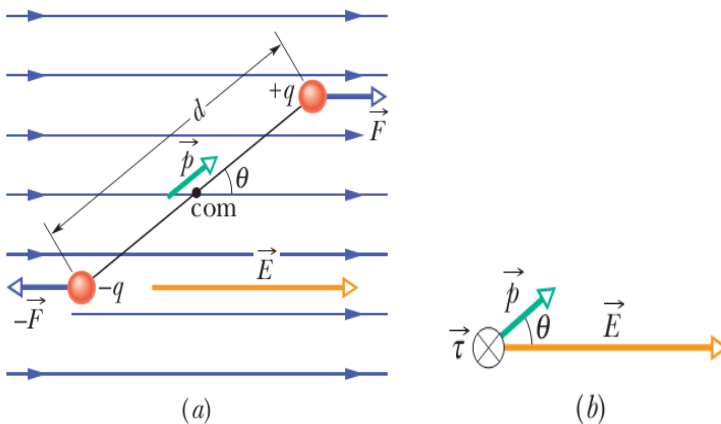
Dipole Dalam Medan Listrik

Dipole adalah pasangan muatan positif dan negatif yang saling berinteraksi dan memiliki momen dipole yang arahnya dari negatif menuju positif (Gambar 4.19). Contoh riil dipole dalam kehidupan sehari-hari dapat ditemui pada molekul air (H_2O). Molekul air tersusun atas ion positif H^+ dan ion negatif O^{2-} . Ion oksigen memiliki ukuran lebih besar dibandingkan ion hidrogen (Gambar 4.24). Berdasarkan rumus molekulnya, air memiliki dua dipole karena terdapat dua interaksi OH . Kedua dipole ini menghasilkan resultan dipole sebesar \bar{p} .



Gambar 4.24 Ilustrasi momen dipole pada molekul H₂O (Halliday dkk., 2015).

Bagaimana pengaruh medan listrik eksternal terhadap dipole-dipole tersebut? Keberadaan dipole dalam medan listrik \vec{E} justru akan menghasilkan torsi yang menyebabkan dipole mengalami rotasi. Perhatikan Gambar 4.25 untuk ilustrasi pengaruh medan listrik \vec{E} terhadap dipole.



Gambar 4.25 Ilustrasi efek medan \vec{E} terhadap dipole (Halliday dkk., 2015).

Berdasarkan Gambar 4.25a, setiap muatan yang membentuk dipole akan mengalami gaya elektrostatis \vec{F} . Akibat perbedaan jenis muatan, maka arah kerja gaya elektrostatis pada kedua muatan juga berlawanan

arah. Kondisi ini justru memicu terjadinya rotasi dipole sebab bekerjanya gaya elektrostatis \vec{F} pada setiap muatan akan menghasilkan torsi $\vec{\tau}$. Arah kerja torsi adalah menuju bidang kertas (Gambar 4.5b). Torsi ini cenderung merotasi dipole ke arah medan listrik \vec{E} . Oleh karena itu, arah rotasi dipole cenderung searah putaran jarum jam (*clockwise*). Secara matematis, torsi yang bekerja pada dipole dapat dinyatakan dengan persamaan 4.45,

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \dots\dots\dots 4.45)$$

$$|\vec{\tau}| = -|\vec{p}||\vec{E}|\sin\theta \dots\dots\dots 4.46)$$

Rotasi yang dialami dipole tidak saja berhubungan dengan torsi, tetapi juga energi potensial listrik yang dimilikinya. Ketika dipole dalam keadaan ekuilibrium maka energi potensialnya bernilai minimum. Keadaan equilibrium terjadi ketika momen dipole \vec{p} searah dengan medan listrik \vec{E} . Sebaliknya, ketika dipole dalam posisi tegak lurus medan listrik maka energi potensialnya bernilai maksimum. Oleh karena itu, untuk merotasi dipole listrik \vec{p} dari posisi tegak lurus mengarah ke nilai sudut θ tertentu maka diperlukan usaha sebesar W yaitu

$$W = \int |\vec{\tau}| d\theta \dots\dots\dots 4.47)$$

Syarat batas $\theta = \pi/2 \rightarrow \theta$, sehingga berlaku

$$W = - \int_{\pi/2}^{\theta} |\vec{p}||\vec{E}|\sin\theta d\theta = |\vec{p}||\vec{E}|\cos\theta \dots\dots\dots 4.48)$$

Usaha W digunakan untuk merubah energi potensial dipoleh ($\Delta U = -W$), maka

$$\Delta U = -|\vec{p}||\vec{E}|\cos\theta \dots\dots\dots 4.49)$$

Berdasarkan persamaan 4.49, maka secara umum energi potensial dipole dapat dirumuskan menggunakan persamaan 4.50, yaitu

$$\vec{U} = -\vec{p} \cdot \vec{E} \dots\dots\dots 4.50)$$

Daftar Pustaka

- Alonso, M dan Finn, E.J. 1967. *University Physics: Field and Waves*. United State of America: Addison-Wesley. Inc.
- Augustyn, A. 2023. Lightning: Meteorology. *Articles*. The Encyclopedia Britannica. Tersedia pada: <https://www.britannica.com/science/atmospheric-electricity>.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. 2015. *Fundamental Physics*, 10th edition. New York: Addison-Wesley.
- Hoffman, F. 1982. Woman Touching Van de Graaff Generator at the American Museum of Science and Energy. *DOE photo*. New York. Tersedia pada: [https://en.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff_generator#/media/File:President_Jimmy_Carter_in_Oak_Ridge_\(7071648945\)_2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff_generator#/media/File:President_Jimmy_Carter_in_Oak_Ridge_(7071648945)_2.jpg).
- Kim, M.I., Chae, B.G., dan Nashigaki, M. 2008. Evaluation of Geotechnical Properties of Saturated Soil Using Dielectric Responses. *Geosciences Journal*. 12 (1): 83–93. DOI 10.1007/s12303-008-0010-0.
- McGrath, S. 2006. Cat Demonstrating Static Cling with Styrofoam Peanuts. *Photo*. Canada: Saint John. Tersedia pada: https://en.wikipedia.org/wiki/Triboelectric_effect#/media/File:Cat_demonstrating_static_cling_with_styrofoam_peanuts.jpg.
- Thompson, S.P. 1881. *Elementary Lessons in Electricity and Magnetism*. New York: MacMillan. Tersedia pada: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_induction#/media/File:Electroscope_showing_induction.png.

Profil Penulis



Gusti Ayu Rai Tirta, M.Pd

Penulis lahir di Denpasar-Bali pada tahun 1994. Penulis telah menyelesaikan studi sarjana dari Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA Universitas Pendidikan Ganesha pada tahun 2016 dan jenjang magister dari Program Studi S2 Pendidikan Sains konsentrasi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Surabaya pada tahun 2018. Sejak tahun 2018 hingga saat ini penulis menjadi guru mata pelajaran fisika dan IPA terapan di SMK Bintang Persada Denpasar. Penulis aktif melakukan riset dibidang pendidikan dan telah mempublikasikan hasil karyanya diberbagai jurnal nasional terakreditasi serta prosiding internasional terindeks Scopus. Penulis juga aktif menulis buku, seperti Penerapan Strategi dan Model Pembelajaran pada Kurikulum Merdeka Belajar, Konsep dan Implementasi Pembelajaran Kreatif, Inovatif, dan Bernalar Kritis, serta Teori Belajar dan Aliran-aliran Pendidikan. Selain itu, penulis juga sangat aktif mengikuti berbagai ajang kompetisi. Pada tahun 2022 penulis meraih *Gold Medal* pada *International Research Teacher Competition* untuk kategori *life science* yang diselenggarakan oleh *Indonesian Young Scientist Association (IYSA)*. Penulis juga merupakan salah satu *awardee Grant SEAMEO QITEP in Science* tahun 2020, *the Best Spirit Teacher Student Company Program School Year 2018-2019*, *A Teacher of Student Company Youth Socio-preneurship Education Program School Year 2018-2019*, *A Teacher of JA BE Entrepreneurial Youth Socio-preneurship Education Program School Year 2018-2019*. Penulis sangat terbuka dengan berbagai kesempatan kolaborasi seperti penulisan buku, jurnal, maupun karya ilmiah lainnya bidang pendidikan dan keilmuan IPA. Pembaca dapat menghubungi penulis melalui gustiyuraitirta@gmail.com.

Hebat Shidow Falah
Universitas Jambi

Fluks Listrik

Persamaan medan listrik mendeskripsikan bagaimana cara menghitung besar medan listrik yang dirasakan di sekitar suatu sumber muatan listrik. Misalnya suatu muatan q berada pada suatu titik tertentu, nilai medan di sekitar muatan tersebut memenuhi persamaan berikut,

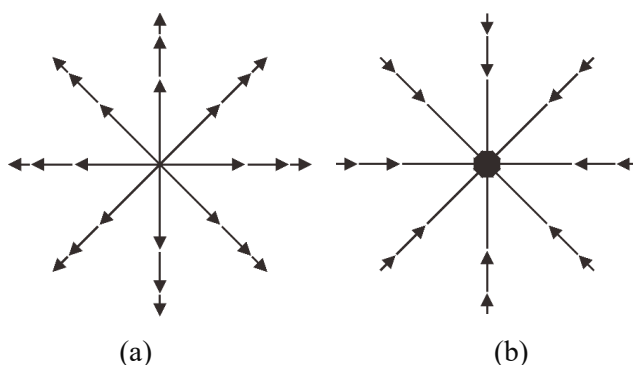
$$\mathbf{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (5.1)$$

Simbol $\mathbf{E}(r)$ melambangkan nilai medan listrik yang dirasakan suatu titik yang berjarak r dari suatu sumber muatan listrik, ϵ_0 melambangkan konstanta permitivitas vakum yang bernilai $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, q melambangkan nilai sumber muatan listrik, r melambangkan jarak titik dari sumber muatan listrik, dan $\hat{\mathbf{r}}$ merupakan vektor satuan pada arah sumbu r (Griffith, 1999).

Mengingat persamaan Hukum Coulomb yang telah dipelajari pada bab sebelumnya, maka dapat diambil informasi bahwa medan listrik \mathbf{E} dan gaya listrik \mathbf{F} berkaitan satu dengan yang lain dengan hubungan persamaan $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$. Hubungan ini dapat dimaknai sebagai berikut, “jika suatu medan listrik dari suatu sumber muatan berinteraksi dengan muatan lain yang ada di sekitarnya, maka antara kedua muatan tersebut akan timbul suatu gaya di antara kedua muatan tersebut.”

Melalui persamaan (5.1), nilai medan listrik yang dirasakan pada suatu titik akan semakin kecil jika jaraknya semakin jauh dari sumber muatan listrik. Agar lebih mendapatkan makna dari persamaan tersebut, kita dapat mengilustrasikannya melalui suatu vektor yang memiliki arah

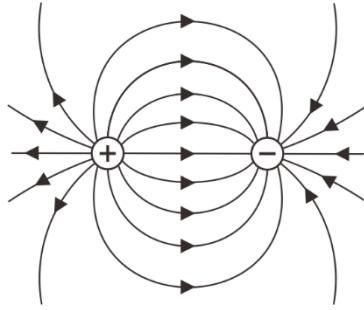
sumbu \hat{r} dan berasal dari sumber muatan listrik q . Semakin jauh dari sumber muatan, panjang vektor akan semakin pendek dengan faktor pengali sebesar $1/r^2$. Jika suatu titik berjarak lebih dekat dari sumber muatan listrik, maka panjang vektor digambarkan lebih panjang. Medan listrik yang ditimbulkan oleh sumber muatan listrik positif digambarkan mengarah ke luar (menjauhi sumber muatan). Sedangkan, medan listrik yang ditimbulkan oleh sumber muatan listrik negatif digambarkan mengarah ke dalam (menuju sumber muatan). Ilustrasi medan listrik E yang dirasakan oleh sembarang titik di sekitar sumber muatan listrik q dapat dilihat pada Gambar 5.1 (a) dan 5.1 (b)



Gambar 5.1. Ilustrasi vektor medan listrik yang berjarak r dari sumber: (a) muatan titik positif, (b) muatan titik negatif.

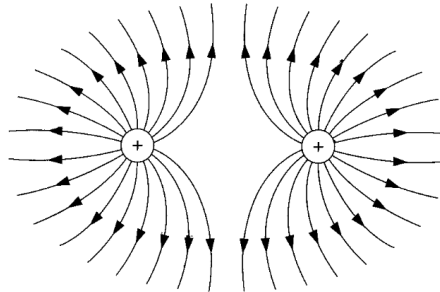
Garis-garis medan yang muncul dari sumber muatan listrik positif secara alamiah akan menuju dan berakhir pada sumber muatan negatif di sekitarnya. Jika tidak ada sumber muatan negatif di sekitarnya, maka garis-garis medan akan mengarah lurus menuju ke arah radial sampai pada jarak yang tak-hingga.

Seperti yang sudah disinggung pada konsep gaya listrik, jika dua sumber muatan listrik yang berbeda tanda berdekatan, maka akan timbul gaya tarik-menarik antara kedua sumber muatan. Sebaliknya, jika dua sumber muatan listrik sejenis didekatkan maka akan timbul gaya tolak-menolak antara kedua sumber muatan. Lebih jauh, ternyata fenomena ini juga berpengaruh terhadap garis-garis medan yang ditimbulkan oleh setiap sumber muatan. Jika garis-garis medan listrik yang timbul dari sumber muatan positif berdekatan dengan sumber muatan negatif, maka garis-garis yang cukup dekat dengan sumber muatan negatif tersebut akan saling tarik dan membentuk garis-garis yang melengkung seperti diilustrasikan pada Gambar 5.2 berikut,



Gambar 5.2 Garis-garis medan di antara dua sumber muatan titik berbeda tanda.

Jika garis-garis medan listrik yang timbul dari sumber muatan positif berdekatan dengan sumber muatan positif yang lain, maka garis-garis medan yang cukup dekat dengan muatan positif lain akan saling tolak-menolak dan membentuk garis-garis medan yang melengkung saling menjauhi seperti pada gambar 5.3,



Gambar 5.3 Garis-garis medan di antara dua muatan listrik positif (Griffith,1999).

Berdasarkan beberapa fenomena terkait garis-garis medan yang digambarkan pada muatan listrik, maka dapat dirangkum beberapa sifat garis-garis medan listrik berikut ini:

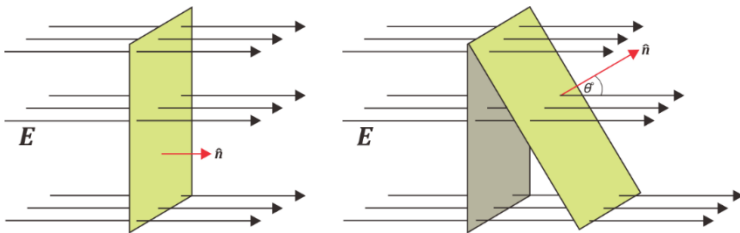
1. Selaras dengan hukum kelestarian energi, garis-garis medan tidak pernah lenyap di suatu titik, melainkan selalu berakhir pada sumber muatan listrik negatif. Jika tidak menemukan sumber muatan negatif di sekitarnya, maka garis-garis medan tersebut akan selalu mewujud dan bergerak lurus menuju jarak tak-hingga.
2. Semakin besar nilai sumber muatan listrik, maka jumlah garis-garis yang melambangkan medan listrik akan semakin banyak.

3. Semakin besar nilai sumber muatan listrik, maka jarak antar garis medan akan semakin rapat.
4. Garis-garis yang melambangkan medan listrik tidak pernah bersilangan satu dengan yang lain.

Misalkan suatu bidang datar dengan luas A berada di dekat sumber muatan listrik q positif. Garis-garis medan listrik yang ditimbulkan sumber listrik tersebut akan menembus bidang datar. Total garis-garis medan yang menembus bidang secara tegak lurus (arah normal \hat{n}) disebut sebagai *fluks listrik*. Jika garis-garis medan listrik menembus bidang dan membentuk sudut θ terhadap arah normal \hat{n} , maka nilai fluks listrik dapat dihitung melalui persamaan,

$$\phi = \mathbf{E} \cdot \hat{n} A = E A \cos\theta \tag{5.2}$$

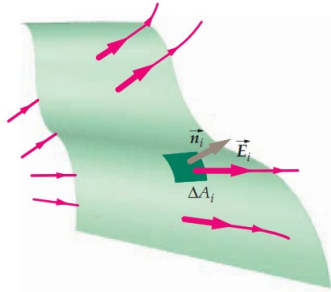
Simbol ϕ melambangkan fluks listrik, \hat{n} melambangkan vektor satuan pada arah normal bidang, A melambangkan luas bidang permukaan, dan θ merupakan sudut yang dibentuk oleh arah garis medan dan arah normal. Dalam satuan internasional (SI), fluks listrik memiliki satuan Nm^2/C . Ilustrasi garis-garis medan \mathbf{E} yang menembus suatu bidang datar disajikan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Garis-garis gaya menembus bidang datar secara: (a) tegak lurus, (b) membentuk sudut θ

Jika bidang merupakan suatu permukaan sembarang (Gambar 5.5), maka fluks listrik pada bidang tersebut merupakan jumlah elemen garis-garis medan yang menembus bidang secara tegak lurus dari setiap luasan yang dilalui oleh setiap garis. Pada batas yang ekstrem, jumlah elemen garis yang mewakili medan listrik akan berjumlah tak hingga, dan luas area permukaan yang dilewati oleh setiap garis akan menjadi infinitesimal. Dengan demikian, nilai fluks pada suatu permukaan sembarang dirumuskan dalam persamaan berikut,

$$\phi = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} \Delta A_i = \int_S \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA \quad (5.3)$$



Gambar 5.5 Garis-garis medan yang menembus suatu bidang sembarang (Tipler, 2007)

Hukum Gauss

Misalkan sebuah sumber muatan listrik berada pada suatu titik tertentu. Sebuah permukaan khayal melingkupi muatan tersebut dengan jarak R . Dapat kita pahami dengan mudah bahwa permukaan ini akan membentuk suatu permukaan kulit bola berjari-jari R dengan sumber muatan listrik sebagai pusatnya. Untuk selanjutnya, permukaan ini disebut sebagai **permukaan Gaussian**. Permukaan ini menjadi batas dua wilayah: wilayah di bawah permukaan dan wilayah di atas permukaan. Oleh karena permukaan yang melingkupi ini berbentuk kulit bola, maka setiap garis yang mewakili medan listrik akan menembus permukaan secara tegak lurus dan memiliki nilai,

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{R^2} \hat{\mathbf{r}} \right)$$

Nilai setiap garis \mathbf{E} bernilai konstan pada setiap titik permukaan pada jarak R , dan total luas permukaan bidang merupakan integral nilai dA . Fluks listrik pada permukaan berjari-jari R dari sumber muatan listrik di pusat bola akan bernilai,

$$\phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Faktanya, kita tidak selalu menghitung fluks yang dihasilkan oleh satu sumber muatan saja. Bisa jadi, kita menghitung beberapa sumber

muatan listrik yang berada di bawah permukaan Gaussian. Lalu bagaimana kita dapat menghitung fluks listrik dari sejumlah sumber muatan pada suatu ruang tertentu?

Misalkan sejumlah sumber muatan listrik tersebar pada suatu daerah tertentu. Pada distribusi muatan tersebut, dimisalkan suatu permukaan Gaussian yang melingkupi seluruh distribusi muatan tersebut. Berdasarkan prinsip superposisi vektor, kita dapat menghitung total medan yang dirasakan oleh suatu titik di permukaan oleh sejumlah sumber muatan melalui kombinasi linier berikut,

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i$$

Dengan demikian, fluks listrik yang menembus permukaan yang melingkupi sejumlah muatan diskrit q_i yang ada di bawah permukaan memenuhi persamaan,

$$\phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dA = \sum_{i=1}^n \left(\oint \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{a} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\epsilon_0} q_i \right)$$

Berdasarkan persamaan-persamaan di atas, jika kita ingin mengambil informasi hubungan antara medan listrik dan muatan listrik total yang berada di bawah permukaan tertutup, maka kita memperoleh persamaan **Hukum Gauss**,

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dA = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \tag{5.4}$$

dengan Q_{enc} merupakan total muatan yang berada di bawah permukaan. Melalui bahasa yang sederhana, Hukum Gauss dapat dipahami sebagai hubungan total fluks yang menembus suatu permukaan tertutup dengan total muatan di dalam permukaan dibagi dengan permitivitas vakum ϵ_0 .

Jika sumber muatan listrik merupakan muatan yang terdistribusi secara kontinu (ρ) di bawah permukaan, maka dengan mengingat bahwa $Q_{enc} = \int_V \rho \, d\tau$ persamaan Hukum Gauss untuk sumber muatan listrik yang terdistribusi secara kontinu di bawah permukaan dapat ditulis dalam bentuk,

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dA = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho(x) \, d^3x \quad (5.5)$$

dengan V merupakan volume di bawah permukaan Gaussian, dan $\int_V \rho(x) \, d^3x$ merupakan integral muatan terhadap volume di bawah permukaan Gaussian.

Persamaan Hukum Gauss dalam bentuk divergensi

Selain dirumuskan dalam bentuk persamaan integral, Hukum Gauss dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan diferensial menggunakan teorema divergensi. Teorema divergensi menyatakan bahwa untuk setiap medan vektor \mathbf{E} yang terdefinisi dalam volume V yang dilingkupi suatu permukaan tertutup S , akan didapatkan hubungan persamaan,

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dA = \int_V \nabla \cdot \mathbf{E} \, d^3x$$

Dengan melakukan substitusi persamaan ini pada persamaan (5.5), dapat diperoleh,

$$\begin{aligned} \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho(x) \, d^3x &= \int_V \nabla \cdot \mathbf{E} \, d^3x \\ \int_V \left(\nabla \cdot \mathbf{E} - \frac{\rho}{\epsilon_0} \right) d^3x &= 0 \end{aligned}$$

Dengan menyelesaikan persamaan tersebut, maka kita memperoleh persamaan **Hukum Gauss** dalam bentuk diferensial,

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5.6)$$

Bentuk persamaan ini lebih ringkas dan lebih mudah diselesaikan daripada persamaan Hukum Gauss dalam bentuk integral. Namun demikian, persamaan ini tidak dapat mengilustrasikan titik, garis dan muatan permukaan secara lebih jelas (Jackson, 2008).

Aplikasi Hukum Gauss

Jika muatan listrik yang terdistribusi memiliki simetri, maka menyelesaikan persoalan-persoalan terkait medan listrik menggunakan persamaan Hukum Gauss merupakan pilihan termudah. Namun demikian, kita perlu memperhatikan permukaan Gaussian yang akan

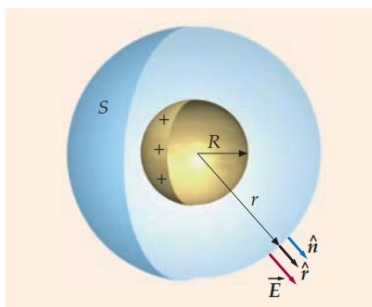
dipilih. Agar memudahkan perhitungan, permukaan yang dipilih sebaiknya memiliki medan listrik \mathbf{E} yang bernilai konstan pada seluruh permukaan. Jika memungkinkan, dapat dipilih permukaan yang memiliki arah \mathbf{E} yang selalu sejajar ataupun tegak lurus dengan permukaan. Sebagai contoh, berikut ini akan disajikan beberapa penggunaan Hukum Gauss pada beberapa kasus.

Medan listrik pada permukaan bola tipis berongga bermuatan homogen

Hitunglah medan listrik yang ditimbulkan oleh sebuah permukaan tipis bola bermuatan homogen yang berjari-jari R dan total muatan Q .

Penyelesaian:

Untuk kasus seperti ini, kita dapat memilih permukaan Gaussian yang berbentuk kulit bola dengan jari-jari $r > R$. Pada permukaan ini, kemudian kita tambahkan elemen-elemen parameter seperti \hat{r} , \hat{n} , medan listrik \mathbf{E} , dan lain-lain seperti pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Permukaan Gaussian berbentuk kulit bola berjari-jari $r > R$ (Tipler, 2007).

Pada persamaan Hukum Gauss, karena jari-jari permukaan bola adalah konstan, maka setiap titik permukaan akan mengalami medan listrik \mathbf{E} yang sama besar. Dengan fakta bahwa medan listrik \mathbf{E} selalu konstan dan tegak lurus terhadap permukaan bola ($\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_r$), serta integral untuk permukaan bola adalah $4\pi r^2$, maka nilai medan listrik \mathbf{E} yang berjari-jari r pada permukaan Gaussian adalah

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{n} \, dA = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{enc}$$

$$\mathbf{E}_r \oint_S dA = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{enc}$$

$$\mathbf{E}_r 4\pi r^2 = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{enc}$$

$$\mathbf{E}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_{enc}}{r^2}$$

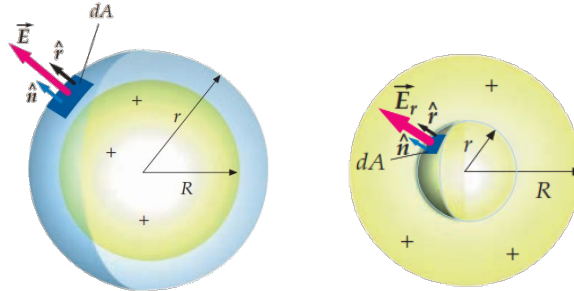
Dengan syarat $Q_{enc} = Q$ jika $r > R$, dan $Q_{enc} = 0$ jika $r < R$.

Medan listrik pada bola pejal bermuatan homogen

Hitunglah medan listrik yang ditimbulkan oleh sebuah bola pejal bermuatan homogen berjari-jari R dan muatan listrik total Q yang terdistribusi di seluruh permukaan dengan rapat muatan $\rho = Q/V$.

Penyelesaian:

Pada kasus ini, kita dapat memilih dua permukaan Gaussian berbentuk kulit bola dengan jari-jari $r > R$ dan $r < R$ (Gambar 5.7 (a) dan (b)). Permukaan Gaussian ini juga akan mengalami medan listrik \mathbf{E} yang konstan di manapun dan selalu tegak lurus permukaan ($\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_r$). Pada permukaan ini, kita tambahkan elemen-elemen dA , \hat{r} , \hat{n} , medan listrik \mathbf{E} , dan lain-lain seperti pada Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Permukaan Gaussian yang berjari-jari r yang melingkupi bola pejal R pada (a) $r > R$; (b) $r < R$ (Tipler, 2007).

Melalui persamaan Hukum Gauss diperoleh,

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{n} dA = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{enc}$$

$$\mathbf{E}_r 4\pi r^2 = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$$

a) Untuk $r > R$ (Gambar 5.7 (a)), maka $Q_{enc} = Q$, sehingga:

$$\mathbf{E}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, \quad \text{untuk } r > R$$

b) Untuk $r < R$, (Gambar 5.7 (b)), maka $Q_{enc} = \rho V$.

Mengingat nilai $\rho = Q/V$, dan $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, maka muatan yang berada di bawah permukaan Gauss menjadi:

$$Q_{enc} = \frac{Q}{V} V' = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi R^3} \frac{4}{3}\pi r^3 = Q \frac{r^3}{R^3}$$

Sehingga medan listrik \mathbf{E}_r untuk $r < R$ menjadi:

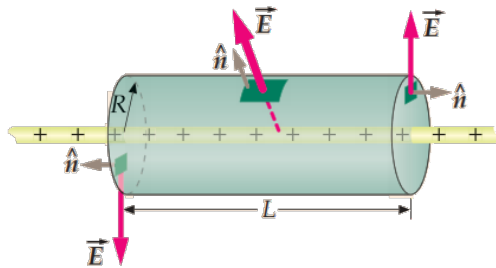
$$\mathbf{E}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_{enc}}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^3} r, \quad \text{untuk } r < R$$

Medan listrik pada kawat penghantar bermuatan homogen lurus tak-hingga

Hitunglah medan listrik yang ditimbulkan sebuah kawat penghantar lurus bermuatan dengan panjang tak-hingga, dengan rapat muatan sebesar λ .

Penyelesaian:

Kawat penghantar berbentuk silinder dengan jari-jari sangat kecil (dapat diabaikan) dan panjang tak-hingga. Pada kondisi ini, kita dapat memilih permukaan Gaussian berbentuk silinder tipis dengan panjang L dan jari-jari R dari kawat yang berada di pusatnya. Permukaan silinder tipis terdiri dari tiga bagian: tutup kiri berbentuk bidang datar lingkaran, tutup kanan berbentuk bidang datar lingkaran, dan sisi lengkung silinder yang menyelimuti silinder sepanjang L .



Gambar 5.8 Permukaan Gaussian berbentuk silinder dengan jari-jari R dan panjang L (Tipler, 2007).

Pada permukaan selimut silinder, kita dapat membuat vektor medan listrik \mathbf{E} yang berasal dari pusat silinder dan menembus permukaan selimut silinder dengan arah selalu tegak lurus permukaan ($\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_r$). Berdasarkan simetri pada geometri silinder, kita dapat menyimpulkan

bahwa medan listrik \mathbf{E} yang menembus arah radial silinder (selimut silinder) akan bernilai konstan.

Pada setiap titik bidang lengkung, arah normal akan selalu sejajar dengan arah jari-jari silinder, atau dapat ditulis $\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{n}}$ ($\hat{\mathbf{R}}$ adalah unit vektor pada arah radial silinder). Fluks listrik yang menembus permukaan selimut silinder pada arah radial menjadi,

$$\phi_R = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} A_{selimut} = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{R}} A_{selimut} = E_R 2\pi RL$$

Fluks listrik yang menembus kedua sisi datar (tutup sisi kiri dan kanan silinder) pada permukaan Gaussian memiliki arah yang sejajar dengan arah arus listrik. Dengan demikian, arah $\hat{\mathbf{n}}$ akan tegak lurus dengan arah medan listrik \mathbf{E}_R dan bernilai

$$\phi_{kiri} = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} A_{kiri} = 0$$

$$\phi_{kanan} = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} A_{kanan} = 0$$

Fluks listrik total merupakan jumlah fluks listrik yang menembus seluruh bidang permukaan (tutup sisi kiri, tutup sisi kanan, dan selimut silinder). Dengan menggunakan persamaan Hukum Gauss pada total muatan di bawah permukaan,

$$\phi_{total} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} = \frac{\lambda V}{\epsilon_0}$$

$$E_R 2\pi RL = \frac{\lambda L}{\epsilon_0}$$

Karena penghantar merupakan kawat lurus panjang, maka diameter silinder dapat diabaikan. Dengan demikian, volumenya hanya bergantung kepada elemen panjangnya saja, sehingga menjadi

$$E_R = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{R}$$

Dalam perhitungan untuk muatan garis (Contoh 5.3.3), diasumsikan bahwa penghantar sangat panjang menuju tak-hingga. Dengan demikian, medan listrik \mathbf{E}_n bernilai konstan di setiap titik pada permukaan Gaussian. Jika suatu titik berada di salah satu ujung penghantar, maka asumsi ini tidak dapat digunakan. Pada kasus ini, menggunakan persamaan Hukum Gauss akan menyulitkan perhitungan. Penting untuk diingat bahwa meskipun Hukum Gauss berlaku untuk setiap permukaan tertutup dan setiap distribusi muatan, persamaan ini hanya akan memudahkan perhitungan jika integral tertutup untuk medan listrik dapat diselesaikan.

Daftar Pustaka

- Giancoli, D. C. (2013). *Physics: Principles with Applications Seventh Edition*. New York: Pearson Addison-Wesley.
- Griffith, D. J. (1999). *Introduction to Electrodynamics Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics Third Edition*. California: John Wiley & Sons.
- Wangsness, R. K. (1986). *Electromagnetic Fields Second Edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2007). *Physics for Scientist and Engineers Sixth Edition*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Young, H. D., Freedman, R., Ford, A. (2008). *Sears and Zemansky's University Physics 12th Edition*. San Fransisco: Pearson Addison-Wesley.

Profil Penulis

Hebat Shidow Falah, S.Pd., M.Sc.



Ketertarikan penulis terhadap ilmu fisika dimulai pada tahun 2009 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke jenjang sekolah menengah di SMA Negeri 1 Ketapang dengan memilih Jurusan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) dan berhasil lulus pada tahun 2012. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 prodi Pendidikan Fisika di Universitas Tanjungpura Pontianak pada tahun 2017. Pada tahun 2021, penulis menyelesaikan studi S2 pada jurusan Fisika di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Pada Tahun berikutnya, penulis memulai karir profesionalnya sebagai dosen prodi Pendidikan Fisika di Universitas Jambi.

Selain melaksanakan pendidikan dan pengajaran di kampus, dan untuk menjalankan karir sebagai dosen profesional, penulis memulai aktif sebagai peneliti dengan kepakaran di bidang *Conceptual Change* dan *Theoretical Physics*. Beberapa penelitian dilakukan pada tahun pertama dan berhasil didanai oleh internal perguruan tinggi. Selain melakukan penelitian, penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi lingkungan masyarakat, bangsa dan negara.

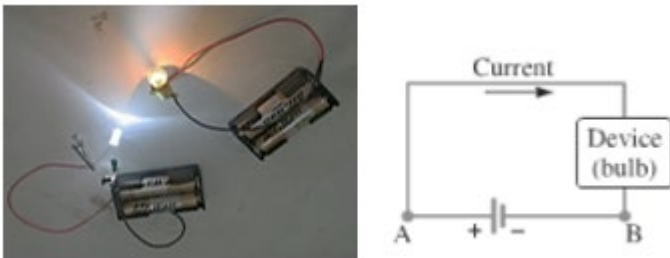
Email Penulis: hebatshidowfalah@unja.ac.id

POTENSIAL LISTRIK

Samsul Arifin
Universitas Palangka Raya

Beda Potensial Listrik

Dalam kehidupan sehari-hari kita sering mendengar tentang konsep-konsep kelistrikan, diantaranya beda potensial listrik. Pada praktiknya, kita lebih menyebutnya dengan tegangan listrik daripada beda potensial listrik. Apabila ada lampu yang menyala dalam sebuah rangkaian listrik, orang akan beranggapan tentang tegangan listrik, bukan beda potensial listrik.



Gambar 6.1. Rangkaian listrik (Chandra Sundaygara, dkk, 2018)

Definisi beda potensial listrik adalah perbedaan energi potensial per satuan muatan antara dua lokasi dalam medan listrik. Sehingga, rumus beda potensial listrik dapat dituliskan sebagai

$$V = \frac{W}{Q} \quad (6.1)$$

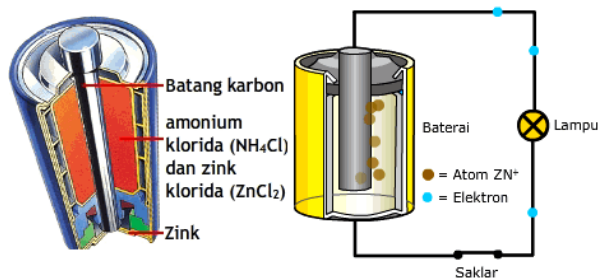
dengan,

V = beda potensial listrik atau tegangan listrik (Volt)

W = energi (Joule)

Q = muatan listrik (Coulomb)

Berdasarkan persamaan tersebut dapat diberikan contoh beda potensial yang terjadi pada baterai. Dari prinsip kerja baterai terjadi beda potensial yang timbul saat terjadi pemisahan muatan positif dan negatif.



Gambar 6.2. Baterai, sumber: <https://www.antotunggal.com/2023/03/bagian-fungsi-cara-kerja-baterai-kering.html>

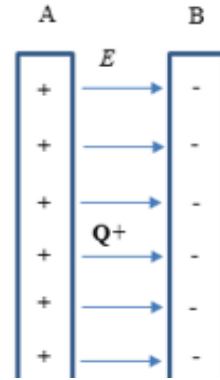
Seperti yang terlihat pada Gambar 6.2, bahwa tegangan timbul akibat dari pemisahan muatan positif dan negatif. Pada batang karbon baterai (elektroda terdalam) hanya terdapat muatan positif dan lapisan Zinc (elektroda luar) hanya terdapat muatan negatif. Akibatnya pada masing-masing kutub baterai akan terdapat beda potensial atau tegangan. Proses pemisahan muatan positif dan negatif terjadi dari reaksi kimia antara campuran MnO_2 dengan $NHCl$ yang terjadi pada baterai yang menyebabkan terjadinya kelebihan elektron pada Zinc sehingga bermuatan negatif dan kekurangan elektron pada karbon sehingga bermuatan positif (Mukhlidi Muskhir dan Muhammad Rais Latif, 2021).

Konsep beda potensial listrik juga dapat dijelaskan pada Gambar 6.4 yaitu dengan melihat nilai potensial listrik.

$$V = \frac{EP}{Q} \quad (6.2)$$

Potensial listrik merupakan besarnya energi potensial listrik (EP) pada setiap satuan muatan (Q). Karena potensial listrik adalah energi potensial elektrostatis per satuan muatan, maka satuan **SI** untuk beda potensial adalah **Joule per Coulomb** atau **Volt (v)** sebagai penghargaan untuk menghormati ilmuwan Alessandro Antonio Volta (1745-1827) atas jasanya dalam bidang kelistrikan.

Pada Gambar 6.3 terdapat dua plat dengan bermuatan positif dan negatif yang mempunyai arah medan listrik senilai E . Apabila ada muatan listrik senilai Q^+ pada plat A maka akan bergerak menuju plat B. Hal ini dikarenakan energi potensial pada plat A lebih besar terhadap plat B.



Gambar 6.3. Plat A bermuatan (+) dan plat B bermuatan (-) bermuatan + dan -

$$EP_A > EP_B \quad (6.3)$$

maka, sesuai dengan hukum kekekalan energi bahwa muatan yang bergerak mempunyai energi kinetik sehingga energi potensial pada plat A lebih besar dibandingkan energi potensial pada plat B.

$$V_A > V_B \quad (6.4)$$

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad (6.5)$$

$$V_{AB} = \frac{EP_A}{Q} - \frac{EP_B}{Q} = \frac{\Delta EP}{Q} \quad (6.6)$$

$$\Delta EP = V_{AB} \cdot Q ; W = \Delta EP \quad (6.7)$$

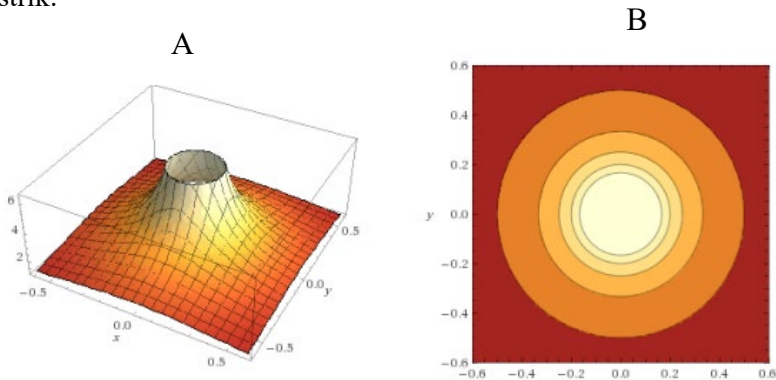
$$W = V_{AB} \cdot Q \quad (6.8)$$

$$F \cdot S = V_{AB} \cdot Q \quad (6.9)$$

Dari persamaan (6.9) dapat dilihat muatan bergerak karena ada gaya dorong, karena plat A bermuatan positif sehingga mendorong muatan lainnya yang bermuatan positif untuk bergerak menuju plat B yang bermuatan negatif.

Permukaan Ekuipotensial dan Medan Listrik

Ekuipotensial mengacu pada wilayah dalam ruang dimana setiap titik di dalamnya memiliki potensial yang sama. Ekuipotensial sering disebut sebagai permukaan atau bidang ekuipotensial, yaitu bidang yang memiliki himpunan titik-titik yang tersebar secara kontinu dan memiliki potensial yang sama. Di dalam listrik didefinisikan sebagai kedudukan titik yang memiliki harga potensial listrik. Garis ekuipotensial seperti halnya garis kontur pada peta yang menunjukkan garis ketinggian yang sama, yang menunjukkan potensial listrik atau tegangan. Garis ekuipotensial berarah tegak lurus terhadap medan listrik.

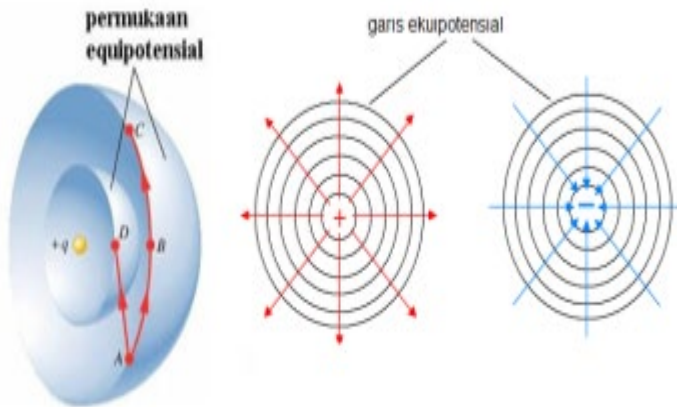


Gambar 6.4. (A) Kurva yang menyatakan lokasi dengan potensial konstan (kurva ekuipotensial), (B) Profil perubahan potensial listrik pada berbagai titik di bidang yang sama dengan tempat muatan berada.

(Mikrajuddin Abdullah, 2017)

Gambar 6.4 merupakan profil potensial listrik pada berbagai posisi di sekitar muatan yang ada di pusat koordinat. Kurva dibuat dengan Wolfram Alpha dengan perintah plot. Gambar (A) merupakan kurva potensial sebagai fungsi koordinat x dan y , artinya kalau kita bergerak sekeliling muatan pada suatu bidang yang sama dengan muatan maka kita ukur perubahan potensial seperti pada gambar tersebut. Gambar (B) merupakan kurva yang menyatakan potensial yang bernilai sama.

Posisi dalam ruang yang mempunyai nilai potensial sama membentuk permukaan ekuipotensial (3D) atau garis ekuipotensial (2D). Untuk muatan titik dalam ruang permukaan ekuipotensialnya berbentuk permukaan bola, sedangkan muatan titik dalam bidang, garis ekuipotensialnya berbentuk lingkaran.



Gambar 6.5. Garis-garis medan tegak lurus permukaan / garis-garis ekuipotensial, sumber:
<https://www.temukanpengertian.com/2015/09/pengertian-bidang-ekipotensial.html>

Medan listrik merupakan lokasi di sekitar muatan listrik, dimana pengaruh gaya listrik masih bisa dirasakan. Apabila kita menggunakan muatan uji untuk mendeteksi adanya medan listrik, maka muatan tersebut akan merasakan gaya F_E .

$$F_E = q \cdot E \text{ atau } E = \frac{F_E}{q} \quad (6.10)$$

$$F_E = q \cdot E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (6.11)$$

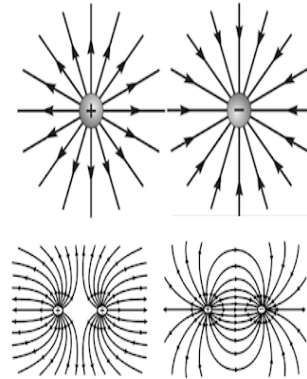
dimana,

F_E = gaya listrik (Newton)

q = muatan listrik (Coulomb)

E = medan listrik (Newton/Coulomb)

Medan listrik direpresentasikan sebagai garis-garis medan listrik, yang keluar dari muatan positif dan masuk menuju muatan negatif. Semakin jauh jarak dari muatan listrik sumbernya, magnitude medan listrik semakin kecil. Apabila diketahui medan listrik (\vec{E}), maka potensial listrik dapat diperoleh dengan pengertian energi potensial listrik sebagai berikut



Gambar 6.6. Medan listrik Sumber: John R Reitz, et al, 1993

$$\Delta V = V(B) - V(A) = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (6.12)$$

Untuk medan listrik yang konstan dan berarah searah dengan $d\vec{S}$ maka akan diperoleh

$$\Delta V = V(B) - V(A) = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{S} = -E(\Delta S_{AB}) \quad (6.13)$$

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta S} \quad (6.14)$$

Potensial Listrik oleh Partikel Bermuatan

Sebagaimana dalam medan listrik, potensial listrik juga menunjukkan seberapa besar energi potensial listrik per satuan muatan. Sehingga dapat juga menentukan gaya yang dialami per satuan muatan.

$$V = \frac{U_E}{q} \quad (6.15)$$

$$V = \frac{U_E}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r} \quad (6.16)$$

Selain dari definisi energi potensial per satuan muatan, potensial listrik dapat didefinisikan sebagai kuat medan listrik per satuan panjang dengan persamaan berikut:

$$V = E \cdot r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r} \quad (6.17)$$

Untuk menghitung energi potensial sebuah partikel bermuatan q yang berada pada jarak r dari muatan lain Q . Dengan menggunakan Hukum Coulomb dapat mengukur kuat medan listrik dari kedua muatan titik.

$$\vec{E}_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \vec{r} \quad (6.18)$$

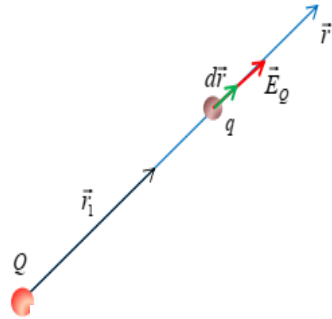
Maka, energi potensial yang dimiliki oleh muatan q adalah

$$U(\vec{r}) = U(\vec{r}_1) - q \int_A^B \vec{E}_Q \cdot d\vec{r} \quad (6.19)$$

Potensial listrik oleh Dipole

Potensial listrik akibat dipole listrik adalah potensial listrik dua muatan titik dengan mempunyai besar yang sama tetapi jenis berbeda dan dipisahkan oleh jarak tertentu (tidak berhimpit). Pada kasus dipol, kita meninjau kasus dimana muatan titik yang terletak di atas sumbu x memiliki tanda positif, sedangkan yang lainnya negatif.

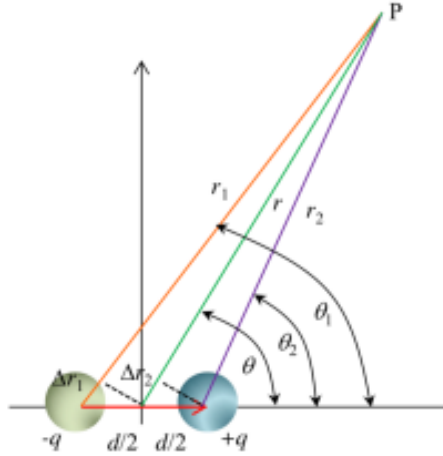
Bagaimana menentukan potensial listrik yang dihasilkan oleh dipol listrik, sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 6.9.



Gambar 6.7. Menentukan energi potensial q di



Gambar 6.8. Skema momen dipol listrik



Gambar 6.9. Menentukan potensial di titik P yang dihasilkan oleh dipol listrik
 Jika jarak titik pengamatan sangat besar dibandingkan d , maka dapat dilakukan aproksimasi $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta$, sehingga

$$\Delta r_1 = \frac{d}{2} \cos\theta \quad (6.20)$$

$$\Delta r_2 = \frac{d}{2} \cos\theta \quad (6.21)$$

Potensial di titik P yang dihasilkan oleh muatan $-q$ adalah

$$V_1 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_1} \quad (6.22)$$

Potensial di titik P yang dihasilkan oleh muatan $+q$ adalah

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_2} \quad (6.23)$$

Potensial total di titik P yang dihasilkan oleh muatan $-q$ dan $+q$ adalah

$$V = V_1 + V_2 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_1} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_2} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (6.24)$$

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{r_1}{r_2 r_1} - \frac{r_2}{r_1 r_2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{[r + \Delta r_1] - [r - \Delta r_2]}{r_1 r_2} \right) \quad (6.25)$$

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{r_1 r_2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\frac{d}{2} \cos\theta + \frac{d}{2} \cos\theta}{r_1 r_2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{d \cos\theta}{r_1 r_2} \right) \quad (6.26)$$

Untuk jarak r yang sangat besar dibandingkan dengan d , dapat mengaproksimasi $r_1 \approx r, \approx r_2 \approx r, r_1 r_2 \approx r r = r^2$, jika $qd = p$, maka

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{d\cos\theta}{r^2} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(qd)\cos\theta}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p\cos\theta}{r^2} \quad (6.27)$$

Potensial Listrik oleh Muatan Terdistribusi Kontinu

Distribusi muatan kontinu dapat dipandang sebagai kumpulan muatan titik (disebut sebagai elemen muatan).

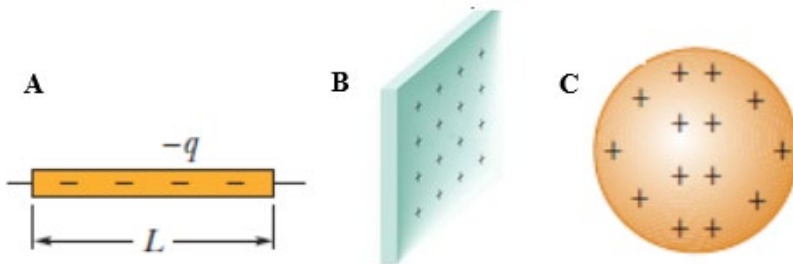
$$V_A = V_{Aq1} + V_{Aq2} + V_{Aq3} + \dots \quad (6.28)$$

$$V_A = k \sum_i \frac{q_i}{r_{Aq_i}} \quad (6.29)$$

distribusi kontinu masing-masing elemen bermuatan dQ ; posisi terhadap titik A: r

$$V_A = k \int \frac{dQ}{r} \quad (6.30)$$

Potensial listrik akibat distribusi muatan adalah:



Gambar 6.10. A. Muatan terdistribusi dalam satu dimensi (1D) rapat muatan persatuan panjang (λ), contohnya adalah batang bermuatan. B. Muatan terdistribusi dalam dua dimensi (2D), rapat muatan persatuan luas (σ), contohnya adalah permukaan/lempengan bermuatan. C. Muatan terdistribusi dalam tiga dimensi (3D), rapat muatan persatuan volume (ρ), contohnya adalah bola/ silinder/ kubus bermuatan.

Energi Potensial Listrik dari Sistem Partikel Bermuatan

Energi potensial terdiri dari energi potensial gravitasi, energi potensial listrik, energi potensial elastis, dan lain sebagainya. Sehingga dapat dikatakan bahwa energi potensial listrik merupakan salah satu dari energi potensial. Energi potensial listrik merupakan besaran skalar. Energi ini dapat diartikan sebagai suatu usaha yang dilakukan gaya coulomb untuk memindahkan muatan uji dari satu titik ke titik yang lain. Energi potensial listrik dalam kehidupan sehari-hari dapat kita

lihat pada lampu yang belum beraliran listrik. Rumus energi potensial listrik adalah

$$E_p = k \frac{Q \cdot q}{r} \quad (6.31)$$

dimana : E_p = energi potensial listrik (Joule), k = konstanta Coulomb ($9 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$), Q = muatan sumber (Coulomb), q = muatan uji (Coulomb), r = Jarak muatan q ke Q (meter)

Contoh Soal:

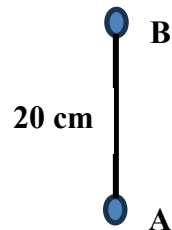
Muatan di A adalah $+6 \mu C$ dan muatan di B adalah $-2 \mu C$. Jarak kedua muatan adalah 20 cm. Berapa energi potensial listrik untuk memindahkan muatan B ke muatan A?

Diketahui:

$$\text{Muatan A } (Q) = +6 \mu C = 6 \times 10^{-6} C$$

$$\text{Muatan B } (q) = -2 \mu C = -2 \times 10^{-6} C$$

$$\text{Jarak antara muatan A dan B } (r) = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$



Ditanya: Energi potensial listrik muatan B jika bergerak ke muatan A?

Jawaban:

$$E_p = k \frac{Q \cdot q}{r}$$

$$E_p = 9 \times 10^9 \frac{(6 \times 10^{-6}) \cdot (2 \times 10^{-6})}{0,2}$$

$$E_p = 54 \times 10^{-2} \text{ Joule}$$

Potensial Listrik oleh Konduktor Bermuatan

Medan listrik dalam konduktor pada keadaan kesetimbangan elektrostatik sama dengan nol dan muatan pada konduktor terdistribusi secara merata di permukaan. Beda potensial antara dua buah titik di dalam konduktor sama dengan nol karena keseluruhan bagian konduktor mempunyai potensial yang sama. Sehingga dapat diartikan bahwa potensial listrik di dalam konduktor dalam keadaan konstan. Namun potensial listrik di luar konduktor akan berkurang seiring dengan semakin jauh jaraknya dari konduktor bermuatan tersebut. Konduktor bermuatan dapat berbentuk bola, silinder, kotak, dan lain sebagainya. Lalu bagaimana potensial listrik pada konduktor

bermuatan? Sebagai contoh akan diberikan cara menghitung potensial listrik pada bola konduktor bermuatan sebagai berikut.

Contoh soal:

Sebuah bola konduktor berjari-jari 10 cm dan bermuatan listrik $2 \mu C$. Tentukanlah potensial listrik pada jarak 5 cm dan 15 cm dari pusat bola konduktor!

Diketahui:

$$q = 2 \mu C = 2 \times 10^{-6} C$$

$$R = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$r_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m} \text{ dan } r_2 = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$$

Ditanya: V_1 (di dalam) dan V_2 (di luar) = ?

Jawaban:

- Potensial listrik dengan jarak 5 cm menunjukkan potensial listrik di dalam bola konduktor. Sehingga potensial listriknya akan sama dengan di luar permukaan bola konduktor. Sehingga jari-jari yang dipakai adalah $R = 0,1 \text{ m}$.

$$V_1 = k \frac{q}{R}$$

$$V_1 = 9 \times 10^9 \frac{2 \times 10^{-6}}{0,1}$$

$$V_1 = 18 \times 10^4 \text{ Volt}$$

- Potensial listrik dengan jarak 15 cm menunjukkan potensial listrik di luar bola konduktor. Sehingga jari-jari yang dipakai adalah $r_2 = 0,15 \text{ m}$

$$V_1 = k \frac{q}{R}$$

$$V_1 = 9 \times 10^9 \frac{2 \times 10^{-6}}{0,15}$$

$$V_1 = 12 \times 10^4 \text{ Volt}$$

Daftar Pustaka

- Abdullah, M. (2017). *Fisika Dasar II*. Institut Teknologi Bandung.
- Muskhir, M. & Latif, M. R. (2021). *Rangkaian Listrik*. Padang: Penerbit UNP Press.
- Reitz, J.R., Milford, F.J. and Christy, R.W. (1993). *Foundations of Electromagnetic Theory*. 4th Edition, Addison-Wesley, Reading, MA, 177-178.
- Sundaygara, C., Pranata, K.B., & Sayadi, M. (2018). *Bahan Ajar Media pembelajaran Percobaan Fisika Materi listrik Magnet*. Malang: Media Nusa Creative.
- Susanti, R.J., Noviani, E., & Fran, F. (2019). *Pemodelan Matematis untuk Persamaan Beda Potensial Listrik*. Buletin Ilmiah Mat.Stat. dan Terapannya (Bimaster) Volume 08, No.4, hal 691-698.

Profil Penulis



Samsul Arifin, S.Pd., M.Si.

Penulis mulai menekuni bidang ilmu fisika dan elektronika dimulai pada tahun 2011 sejak memasuki perguruan tinggi. Penulis belajar fisika dan elektronika dengan menempuh pendidikan S1 di Universitas PGRI Semarang, yang lulus pada tahun 2016. Kemudian pada tahun 2018 melanjutkan pendidikan magister di Universitas Diponegoro dan berhasil menyelesaikan studi S2 pada tahun 2020 dengan bidang minat fisika instrumentasi dan elektronika.

Penulis memiliki kepakaran dibidang fisika instrumentasi dan elektronika, dan berkarir sebagai dosen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya. Selain mengajar, mengelola laboratorium fisika, penulis juga melaksanakan aktifitas sebagai peneliti dan melaksanakan program pengabdian kepada masyarakat. Sebagai peneliti dibidang kepakarannya tersebut, penulis meneliti dan mengabdikan bersama dengan mahasiswa dan masyarakat. Beberapa penelitian yang telah dilakukan didanai oleh internal perguruan tinggi dan juga Kemenristek DIKTI. Selain peneliti, penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi kemajuan bangsa dan Negara Indonesia.

Email Penulis: samsularifin@mipa.upr.ac.id.

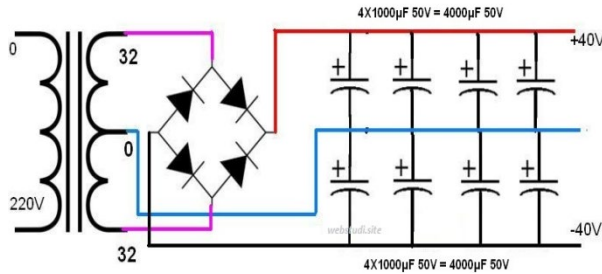
KAPASITANSI

Muh. Said L

Jurusan Fisika Fakultas Sains Dan Teknologi Universitas Islam Negeri
Alauddin Makassar

Kapasitor adalah salah satu komponen penting dalam bidang teknologi dan digunakan dalam berbagai aplikasi sehari-hari. Fungsi utama kapasitor adalah menyimpan dan melepaskan energi listrik dengan cepat. Kapasitor memiliki banyak penerapan dalam kehidupan sehari-hari, terutama dalam bidang teknologi. Komponen tersebut digunakan dalam peralatan rumah tangga, motor listrik, pemfilteran sinyal, sistem tenaga listrik, elektronika, komunikasi, lampu kilat, dan banyak lagi. Kapasitor membantu meningkatkan kinerja, efisiensi, dan kualitas daya dalam berbagai aplikasi teknologi yang kita gunakan setiap hari. Berikut ini uraian beberapa contoh penerapan kapasitor dalam kehidupan sehari-hari:

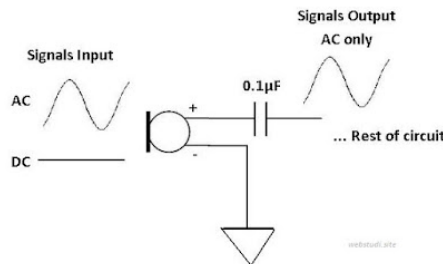
- a. Penggunaan listrik rumah tangga: kapasitor digunakan dalam berbagai peralatan rumah tangga seperti AC, kulkas, pompa air, dan mesin cuci. Kapasitor membantu memulai dan menjaga kinerja optimal peralatan elektronik ini dengan menyediakan daya tambahan saat diperlukan.
- b. Sebagai sumber catu power supply, sehingga disebut kapasitor power supply, atau yang dikenal juga sebagai kapasitif dropper, yaitu jenis sumber daya yang menggunakan reaktansi kapasitif dari kapasitor untuk menurunkan tegangan listrik menjadi tingkat yang lebih rendah (seperti ditunjukkan pada gambar 7.1)



Gambar 7.1: Kapasitor Power Supply

(<https://www.webstudi.site/2019/02/fungsi-kapasitor-jenis-kapasitor.html>)

- c. Sistem tenaga listrik: kapasitor besar digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mengkompensasi faktor daya dan meningkatkan efisiensi energi. Mereka membantu meningkatkan kualitas daya dan mengurangi rugi daya dalam jaringan distribusi listrik.
- d. Elektronika dan komunikasi: kapasitor juga digunakan dalam berbagai aplikasi elektronika dan komunikasi. Komponen tersebut digunakan dalam sirkuit penghilang noise, pengkondisi sinyal, dan menyimpan energi dalam perangkat seperti komputer, smartphone, pemancar radio, dan peralatan elektronik lainnya.
- e. Pemfilteran dan penyaringan: kapasitor digunakan dalam sirkuit pemfilteran dan penyaringan untuk menghilangkan noise dan interferensi pada sinyal listrik., serta membantu menjaga kualitas sinyal dalam perangkat elektronik seperti radio, televisi, dan perangkat audio. Rangkaian dasarnya ditunjukkan pada gambar 7.2.



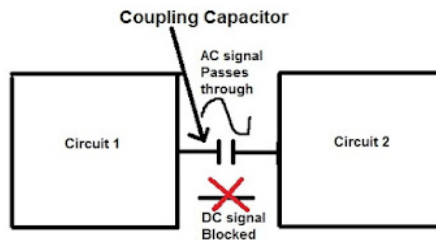
Gambar 7.2 Kapasitor sebagai penyaring

(<https://www.webstudi.site/2019/02/fungsi-kapasitor-jenis-kapasitor.html>)

- f. Penyalan motor listrik: kapasitor digunakan dalam motor listrik, terutama pada motor induksi satu fasa. Kapasitor memainkan

peran penting dalam memulai motor dengan memberikan torsi tambahan pada awalnya. Setelah motor berjalan, kapasitor dilepas dari sirkuit.

- g. Lampu kilat dan kamera: kapasitor digunakan dalam lampu kilat dan kamera untuk memberikan energi yang diperlukan dalam waktu singkat. Ketika tombol *shutter* ditekan, kapasitor melepaskan muatan listrik dengan cepat, dan menghasilkan kilatan cahaya atau memicu pengambilan gambar.
- h. Sistem penerangan: kapasitor juga digunakan dalam sistem penerangan seperti lampu pijar atau lampu neon untuk memperbaiki faktor daya, meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi *flicker* pada cahaya.
- i. Sebagai penghubung kopling (disebut kapasitor kopling), digunakan untuk menghubungkan dua rangkaian seri dengan cara memasang secara bersama. Kapasitor ini memungkinkan hanya sinyal AC dari rangkaian pertama yang dapat melintas, sedangkan sinyal DC diblokir agar tidak masuk ke rangkaian kedua. Dengan demikian, hanya sinyal AC yang diperbolehkan untuk melewati kapasitor ini.



Gambar 7.3 Kapasitor sebagai penghubung

(<https://www.webstudi.site/2019/02/fungsi-kapasitor-jenis-kapasitor.html>)

Jenis-jenis kapasitor terdiri dari:

- a. Berdasarkan polaritasnya, dibagi menjadi dua yaitu: kapasitor polar dan non polar. Sesuai dengan namanya kapasitor polar adalah jenis kapasitor yang memiliki polaritas positif (+) dan polaritas negatif (-). Dalam penggunaan kapasitor ini maka wajib memperhatikan polaristanya ketika pemasangan, dengan kata lain tidak boleh dipasang secara terbalik. Cara mengetahui polaritasnya adalah dengan memperhatikan bodi kapasitor, dengan memperhatikan bodi kapasitor maka dapat ditentukan kaki yang memiliki polaritas positif (+) maupun negatif (-). Sedangkan kapasitor non-polar adalah jenis

kapasitor dimana kedua kutub atau kaki tidak memiliki polaritas yang spesifik. Dengan kata lain, penggunaan kapasitor non-polar lebih mudah karena tidak perlu memperhatikan orientasi pemasangan kutubnya, sehingga dapat dihubungkan secara bebas tanpa memperhatikan arah kutubnya. Kapasitor non-polar umumnya memiliki nilai kapasitansi yang relatif kecil, dan bahan dielektrik yang digunakan meliputi keramik, kertas, polyester, dan mika. Bentuk fisik kapasitor ditunjukkan seperti pada gambar 7.4 berikut ini:



Gambar 7.4: Bentuk fisik jenis-jenis kapasitor
<https://erudisi.com/jenis-jenis-kapasitor/>

- b. Berdasarkan bahan pembuat dielektrik terdiri dari kapasitor elektrolit (ELCO), kapasitor tantalum, kapasitor keramik, kapasitor keramik berlapis (*multilayer ceramic capacitor*), kapasitor polyester film (*polyester film capacitor*), kapasitor polipropilen (*polypropilene capacitor*), kapasitor mika, kapasitor polystyrene film, kapasitor super (*elektric double capacitor*).

c. Berdasarkan ketetapan nilai, dibagi menjadi dua yaitu kapasitor dengan nilai tetap dan kapasitor variabel. Kapasitor dengan nilai tetap adalah jenis kapasitor yang memiliki nilai kapasitansi yang konstan dan tidak berubah-ubah. Kapasitor ini memiliki beberapa variasi, di antaranya adalah: kapasitor keramik, kapasitor polyester, kapasitor kertas, kapasitor elektrolit, kapasitor tantalun. Sedangkan kapasitor variabel (*variable capacitor*), adalah salah satu jenis kapasitor dimana nilai kapasitansinya dapat disesuaikan atau diubah-ubah. Secara fisik, kapasitor variabel terdiri dari dua jenis, yaitu: VARCO (*Variable Condensator*) dan *trimmer*.

Pada bab ini akan diuraikan tujuh topik pembahasan yaitu sebagai berikut:

Kapasitansi dari Kapasitor

Kapasitansi adalah sifat suatu kapasitor yang menunjukkan kemampuannya untuk menyimpan muatan listrik. Kapasitansi didefinisikan sebagai rasio antara muatan listrik (Q) yang disimpan dalam kapasitor dengan tegangan (V) yang diterapkan pada kapasitor tersebut. Satuan kapasitansi dalam sistem International (SI) adalah farad (F), yang diberi nama sesuai dengan ilmuwan Michael Faraday. Secara matematis, kapasitansi (C) (Giancoli, D. C., 2014; Young, D. F. & Freedman, R. A., 2014) dapat dinyatakan sebagai:

$$C = Q / V \tag{7.1}$$

Keterangan:

C : kapasitansi dalam farad (F),

Q : muatan listrik dalam coulomb (C),

V : tegangan yang diterapkan pada kapasitor dalam volt (V).

Kapasitor memiliki nilai yang dapat diukur dan dinyatakan dalam satuan farad (F), milifarad (mF), mikrofard (μ F), nanofard (nF), atau pikofard (pF). Proses konversi nilai kapasitansi ini mirip dengan konversi nilai resistansi dalam rangkaian listrik.

$$1 \text{ Farad} = 1.000.000 \mu\text{F} \qquad 1 \mu\text{F} = 1.000 \text{ nF}$$

$$1 \mu\text{F} = 1.000.0000 \text{ pF} \qquad 1 \text{ nF} = 1.000 \text{ pF}$$

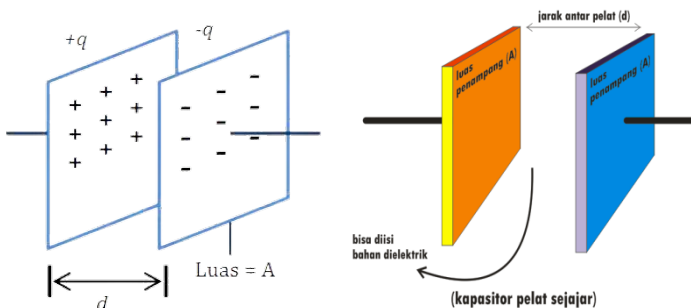
Kapasitansi suatu kapasitor tergantung pada beberapa faktor, termasuk geometri dan bahan konstruksi kapasitor. Beberapa faktor yang mempengaruhi kapasitansi adalah:

- Luas permukaan elektroda: kapasitansi meningkat dengan meningkatnya luas permukaan elektroda kapasitor. Semakin besar luas permukaan elektroda, semakin banyak muatan listrik yang dapat disimpan.
- Jarak antar elektroda: kapasitansi berbanding terbalik dengan jarak antara elektroda kapasitor. Semakin kecil jarak antara elektroda, semakin besar kapasitansi karena muatan listrik lebih dekat satu sama lain.
- Sifat dielektrik: kapasitor umumnya memiliki bahan dielektrik yang memisahkan elektroda. Sifat dielektrik dari bahan tersebut juga mempengaruhi kapasitansi. Dielektrik yang memiliki konstanta dielektrik yang tinggi akan meningkatkan kapasitansi.
- Bentuk geometri: bentuk geometri dari kapasitor juga mempengaruhi kapasitansi. Misalnya, kapasitor dengan bentuk tabung memiliki kapasitansi yang berbeda dengan kapasitor dengan bentuk lembaran.

Kapasitansi yang lebih besar pada sebuah kapasitor berarti hal dapat menyimpan muatan listrik yang lebih besar untuk tegangan yang diberikan.

Kapasitansi Kapasitor Pelat Sejajar

Kapasitor pelat sejajar adalah salah satu jenis kapasitor yang terdiri dari dua pelat datar dan sejajar satu sama lain, dengan bahan dielektrik di antara keduanya (seperti ditunjukkan pada gambar 7.5). Kapasitor ini sering digunakan dalam aplikasi seperti filter, penyimpanan energi, dan sirkuit elektronik. Pada kapasitor pelat sejajar, kapasitansi (C) tergantung pada beberapa parameter geometri dan sifat bahan dielektrik yang digunakan.



Gambar 7.5 Skema kapasitor pelat sejajar
<https://fisikahepi.hepidev.com/2021/04/01/kapasitor/>

Berikut adalah penjelasan mengenai kapasitansi kapasitor pelat sejajar:

- a. Luas permukaan (A): Luas permukaan pelat kapasitor sejajar mempengaruhi kapasitansi. Semakin besar luas permukaan pelat, semakin besar kapasitansi. Misalnya, jika luas permukaan pelat diperbesar, kapasitor dapat menyimpan muatan listrik yang lebih banyak.
- b. Jarak antar pelat (d): Jarak antara kedua pelat kapasitor sangat penting dalam menentukan kapasitansi. Semakin kecil jarak antara pelat, semakin besar kapasitansi. Hal ini disebabkan oleh interaksi elektrostatik yang lebih kuat antara pelat yang lebih dekat, yang memungkinkan kapasitor untuk menyimpan muatan listrik dengan lebih efektif.
- c. Konstanta dielektrik (ϵ_r): Bahan dielektrik yang mengisi ruang antara pelat kapasitor sejajar memiliki konstanta dielektrik tertentu. Konstanta dielektrik adalah ukuran dari sejauh mana bahan dielektrik dapat mengurangi medan listrik antara pelat. Semakin tinggi konstanta dielektrik, semakin besar kapasitansi.

Maka kapasitansi kapasitor pelat sejajar dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Frederick J.B & Eugene H., 2006):

$$C = (\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A) / d \quad (7.2)$$

Keterangan:

- ϵ_0 : permitivitas vakum (konstanta elektrostatik) sebesar 8.854×10^{-12} F/m.
 ϵ_r : konstanta dielektrik bahan dielektrik yang mengisi ruang antara pelat.
A : luas permukaan pelat dalam meter persegi (m^2).
d : jarak antara pelat dalam meter (m).

Persamaan (7.2) merupakan pendekatan untuk kapasitor dengan pelat yang sangat besar dan jarak yang sangat kecil dibandingkan dengan ukuran pelat itu sendiri. Dapat disimpulkan bahwa:

- a. Semakin luas pelat (A), semakin banyak muatan (Q) yang tertampung, artinya kapasitas kapasitor (C) semakin besar.
- b. Semakin dekat jarak kedua pelat (d), maka semakin banyak pula muatan (Q) yang dapat tertampung karena kapasitas kapasitor (C) semakin besar.

c. Agar bisa sangat dekat jarak antara dua pelat ini, maka kedua pelat ditempelkan, dengan dihalangi bahan dielektrik (ϵ). Bahan dielektrik adalah bahan yang dapat mengikat elektron lebih baik dibandingkan ruang hampa udara.

Bagaimana halnya jika kapasitor terbuat dari bahan selain udara, maka untuk menjawab pertanyaan tersebut, mari kita perhatikan persamaan berikut jika medium yang digunakan untuk mengisi kapasitor adalah bahan selain udara (Giancoli, D. C., 2014; Young, D. F. dan Freedman, R. A., 2014)

$$C = K C_0 \quad (7.3)$$

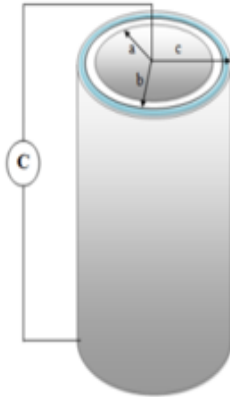
Keterangan:

- C : kapasitas kapasitor saat disisipi bahan dielektrik selain udara (F);
- C_0 : kapasitas kapasitor di dalam udara (F); dan
- K : konstanta dielektrik yang nilainya ≥ 1 .

Apabila kita mengisi medium di dalam kapasitor dengan bahan selain udara, maka bahan yang digunakan haruslah bahan dielektrik. Bahan dielektrik merujuk pada bahan yang memiliki sifat isolator, sehingga mampu mencegah dua keping kapasitor yang sejajar untuk bersentuhan satu sama lain.

Kapasitansi Kapasitor Silinder

Kapasitor silinder adalah salah satu bentuk kapasitor yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi. Ini terdiri dari dua elektroda silinder yang dilapisi oleh bahan dielektrik di antara mereka. Elektroda dalam kapasitor silinder dapat berupa silinder dalam atau silinder luar, tergantung pada tata letaknya.



Gambar 7.6 Kapasitor tabung silinder dengan dua bahan dielektrik (Makarius, 2020)

Untuk memahami kapasitansi kapasitor silinder, pertama-tama kita perlu memahami beberapa parameter geometri yang relevan:

- Jari-jari elektroda dalam kapasitor silinder (a) atau disebut jari elektroda saja.
- Jari-jari elektroda luar kapasitor silinder (b) atau jari-jari elektroda bahan dielektrik.
- Jari-jari elektroda luar kapasitor silinder (c) atau jari-jari elektroda bahan dielektrik lainnya (jika memiliki dua jenis bahan dielektrik yang berbeda)
- Panjang kapasitor (L) kapasitor silinder.
- Jarak antara elektroda dalam dan elektroda luar (d).

Kapasitansi (C) kapasitor silinder dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut (Halliday, D., Resnick, R., dan Walker, J. (2014):

$$C = (2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot L \cdot K) / \ln(b/a) \quad (7.4)$$

Keterangan:

ϵ_0 : permitivitas vakum (konstanta elektrostatik $8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

$\ln(r_2/r_1)$: logaritma natural dari rasio jari-jari luar dan dalam.

K : konstanta relatif bahan dielektrik

Berdasarkan persamaan (7.4) di atas, beberapa hal yang perlu diperhatikan tentang kapasitansi kapasitor silinder adalah:

- Kapasitansi kapasitor silinder berbanding lurus dengan panjang kapasitor (L). Semakin panjang kapasitor, semakin besar kapasitansinya.
- Kapasitansi juga berbanding lurus dengan luas permukaan elektroda. Dalam kasus kapasitor silinder, luas permukaan

elektroda sebanding dengan panjang kapasitor dan jari-jari elektroda.

- c. Jarak antara elektroda (d) mempengaruhi kapasitansi secara invers. Semakin kecil jarak antara elektroda, semakin besar kapasitansi.
- d. Rasio jari-jari luar dan dalam (r_2/r_1) juga mempengaruhi kapasitansi. Semakin besar perbedaan antara jari-jari luar dan dalam, semakin besar kapasitansi.

Persamaan di atas mengasumsikan bahwa bahan dielektrik antara elektroda memiliki ketebalan yang sangat kecil dibandingkan dengan jarak antara elektroda. Dalam pemahaman dan perhitungan praktis, persamaan tersebut dapat disederhanakan dengan mempertimbangkan kasus-kasus khusus, seperti kapasitor silinder dengan jari-jari yang sangat besar atau sangat kecil, serta kasus dengan jarak antara elektroda yang sangat kecil atau sangat besar (Makarius, 2020)

Bagaimana halnya jika menggunakan dua jenis bahan dielektrik. Kapasitansi kapasitor silinder yang mengandung dua jenis bahan dielektrik yang berbeda dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0 L K_1}{\ln \frac{b}{a}} \quad (7.5)$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0 L K_2}{\ln \frac{c}{b}} \quad (7.6)$$

Dengan menggunakan persamaan rangkaian kapasitor disusun secara seri maka diperoleh:

$$\frac{1}{C} = \frac{\ln \frac{b}{a}}{2\pi\epsilon_0 L K_1} + \frac{\ln \frac{c}{b}}{2\pi\epsilon_0 L K_2} \quad (7.7)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L K_1 \cdot K_2}{\ln \frac{b}{a} + \ln \frac{c}{b}} \quad (7.8)$$

Keterangan:

C : kapasitansi kapasitor (F).

K1 : konstanta relatif bahan dielektrik cairan (F/m)

K2 : konstanta relatif bahan dielektrik bahan lain (F/m).

Dari persamaan (7.8), nilai kapasitansi kapasitor tabung silinder sangat dipengaruhi oleh komponen geometri dari bentuk kapasitor tersebut, seperti jari-jari elektroda (a), jari-jari bahan K1 (b), jari-jari bahan dielektrik K2, atau jari-jari kulit tabung silinder (c), serta pengaruh dari konstanta bahan dielektrik. Ketika kapasitor dialiri arus listrik, ia akan

menunjukkan sifat yang sesuai dengan arus yang mengalir melalui kapasitor tersebut. Untuk arus DC (arus searah), kapasitor berfungsi sebagai isolator atau hambatan terhadap arus listrik, sedangkan untuk arus AC (arus bolak-balik), kapasitor berfungsi sebagai konduktor atau membiarkan arus listrik melalui. Dalam aplikasinya, kapasitor digunakan sebagai filter atau penyaring, untuk meratakan tegangan DC dalam pengubah tegangan dari AC ke DC, dalam pembangkit gelombang AC atau osilator, dan berbagai aplikasi lainnya.

Kapasitansi Kapasitor Sferis

Kapasitor sferis adalah jenis kapasitor yang terdiri dari dua elektroda sferis dengan jarak antara mereka diisi dengan bahan dielektrik. Kapasitor sferis biasanya digunakan dalam aplikasi seperti pemisahan muatan, penyimpanan energi, dan eksperimen fisika. Untuk memahami kapasitansi kapasitor sferis, berikut adalah penjelasan yang lebih mendalam tentang konsep ini (Halliday, D., Resnick, R., dan Walker, J., 2014), sebagai berikut:

- a. Jari-jari dalam (r_1) dan jari-jari luar (r_2): kapasitor sferis memiliki dua elektroda sferis dengan jari-jari berbeda. Jari-jari dalam (r_1) adalah jari-jari elektroda dalam, sementara jari-jari luar (r_2) adalah jari-jari elektroda luar. Jarak antara dua elektroda ini dianggap jauh lebih kecil daripada jarak elektroda dari pusat kapasitor.
- b. Jarak antara elektroda (d): jarak antara elektroda dalam dan elektroda luar pada kapasitor sferis juga memainkan peran penting dalam kapasitansi. Semakin kecil jarak antara elektroda, semakin besar kapasitansi.
- c. Konstanta dielektrik (ϵ_r): bahan dielektrik yang mengisi ruang di antara elektroda pada kapasitor sferis memiliki konstanta dielektrik tertentu. Konstanta dielektrik adalah ukuran sejauh mana bahan dielektrik dapat mengurangi medan listrik antara elektroda. Semakin tinggi konstanta dielektrik, semakin besar kapasitansi.

Kapasitansi (C) kapasitor sferis dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C = \frac{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{r_1}{r_2}}{r_2 - r_1} \quad (7.9)$$

Keterangan:

ϵ_0 adalah permitivitas vakum (konstanta elektrostatik) sebesar 8.854×10^{-12} F/m.

ϵ_r adalah konstanta dielektrik bahan dielektrik yang mengisi ruang di antara elektroda.

r_1 adalah jari-jari elektroda dalam dalam meter (m).

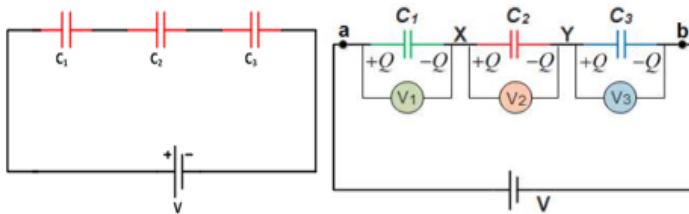
r_2 adalah jari-jari elektroda luar dalam meter (m).

Persamaan (7.9) diasumsikan bahwa jarak antara elektroda (d) sangat kecil dibandingkan dengan jarak elektroda dari pusat kapasitor. Selain itu, persamaan tersebut mengasumsikan bahwa permukaan elektroda adalah sempurna sferis dan bahan dielektriknya homogen.

Rangkaian Kapasitor

1. Kapasitor Terangkai Seri

Rangkaian kapasitor terhubung seri adalah pengaturan kapasitor di mana kapasitor-kapasitor tersebut terhubung berturut-turut satu sama lain. Dalam rangkaian ini, terminal positif kapasitor pertama terhubung ke terminal negatif kapasitor kedua, dan seterusnya, membentuk rantai berurutan (seperti pada gambar 7.7)



Gambar 7.7 Rangkaian kapasitor disusun seri
(Frederick J.B & Eugene H., 2006)

Karakteristik rangkaian kapasitor terhubung seri dapat diuraikan sebagai berikut:

- Kapasitansi total (C_{total}): Kapasitansi total rangkaian kapasitor terhubung seri dapat ditemukan dengan menjumlahkan invers dari kapasitansi masing-masing kapasitor dalam rangkaian (Frederick J.B & Eugene H., 2006). Ini dinyatakan dengan rumus:

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (7.10)$$

C_1 , C_2 , C_3 , dan seterusnya adalah kapasitansi masing-masing kapasitor dalam rangkaian. Dalam rangkaian kapasitor terhubung seri, kapasitansi total (C_{total}) akan lebih kecil dari kapasitansi terkecil dalam rangkaian. Dalam rangkaian seri,

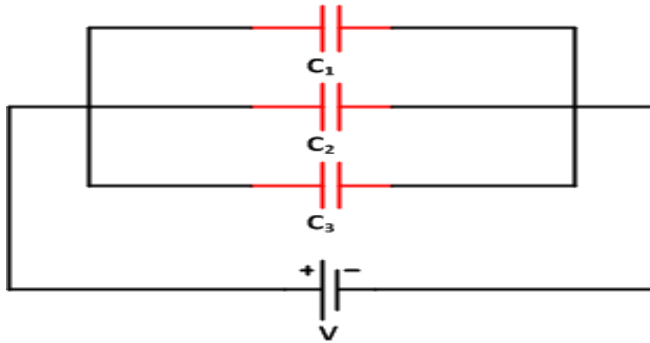
kapasitansi efektif dipengaruhi oleh adanya penghalang dalam bentuk kapasitor.

- b. Pengisian dan pengosongan: Ketika rangkaian kapasitor terhubung seri dihubungkan ke sumber tegangan (misalnya, baterai), muatan listrik mulai mengalir ke kapasitor-kapasitor tersebut. Namun, karena kapasitor-kapasitor terhubung secara seri, arus yang mengalir melalui setiap kapasitor akan sama. Oleh karena itu, waktu pengisian dan pengosongan kapasitor dalam rangkaian seri akan tergantung pada kapasitansi individu masing-masing kapasitor. Kapasitor dengan kapasitansi yang lebih kecil akan mengisi atau mengosongkan lebih cepat dibandingkan dengan kapasitor dengan kapasitansi yang lebih besar. Ini dikarenakan kapasitor dengan kapasitansi yang lebih kecil memiliki impedansi yang lebih rendah terhadap aliran arus listrik.
- c. Tegangan total (V_{total}): Tegangan total pada rangkaian kapasitor terhubung seri adalah jumlah tegangan pada masing-masing kapasitor dalam rangkaian. Jumlah tegangan ini sama dengan tegangan yang diberikan oleh sumber tegangan yang terhubung ke rangkaian. Tegangan pada masing-masing kapasitor dalam rangkaian seri akan berbeda, tetapi jumlah tegangan pada semua kapasitor harus sama dengan tegangan total dari sumber.

Dalam rangkaian kapasitor terhubung seri, kapasitor-kapasitor tersebut saling berbagi tegangan yang sama, tetapi kapasitansi totalnya lebih kecil dibandingkan dengan kapasitansi masing-masing

2. Kapasitor Terangkai Paralel

Rangkaian kapasitor terhubung paralel adalah pengaturan kapasitor di mana kapasitor-kapasitor tersebut terhubung secara paralel, yaitu ujung positif kapasitor pertama terhubung ke ujung positif kapasitor kedua, dan begitu seterusnya, begitu juga dengan ujung negatifnya (seperti ditunjukkan pada gambar 7.8) sebagai berikut:



Gambar 7.8 Rangkaian kapasitor disusun paralel
(Frederick J.B & Eugene H., 2006)

Untuk memahami karakteristik rangkaian kapasitor terhubung paralel, berikut adalah penjelasan lebih mendalam tentang materi ini:

- a. Kapasitansi total (C_{total}): Kapasitansi total rangkaian kapasitor terhubung paralel dapat ditemukan dengan menjumlahkan kapasitansi masing-masing kapasitor dalam rangkaian (Frederick J.B & Eugene H., 2006). Ini dinyatakan dengan rumus:

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (7.11)$$

C_1 , C_2 , C_3 , dan seterusnya adalah kapasitansi masing-masing kapasitor dalam rangkaian. Dalam rangkaian kapasitor terhubung paralel, kapasitansi total (C_{total}) akan lebih besar dari kapasitansi terbesar dalam rangkaian. Dalam rangkaian paralel, kapasitansi efektif bertambah karena masing-masing kapasitor memberikan jalur tambahan bagi muatan listrik.

- b. Pengisian dan pengosongan: Ketika rangkaian kapasitor terhubung paralel dihubungkan ke sumber tegangan (misalnya, baterai), muatan listrik mulai mengalir ke setiap kapasitor dalam rangkaian. Karena kapasitor-kapasitor terhubung secara paralel, tegangan pada masing-masing kapasitor akan sama. Namun, kapasitor dengan kapasitansi yang lebih besar akan mampu menyimpan muatan yang lebih besar dibandingkan dengan kapasitor dengan kapasitansi yang lebih kecil. Oleh karena itu, kapasitor dengan kapasitansi yang lebih besar akan mengisi atau mengosongkan lebih lambat dibandingkan dengan kapasitor dengan kapasitansi yang lebih kecil.

Energi Listrik yang Tersimpan Dalam Kapasitor

Energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor terkait erat dengan kapasitansi kapasitor dan tegangan yang diterapkan kepadanya. Ketika sebuah kapasitor terisi, muatan listrik terakumulasi di antara dua pelat atau dalam ruang dielektrik, menyebabkan terbentuknya medan listrik di dalamnya.

Untuk memahami energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor, kita dapat menggunakan rumus berikut (Frederick J.B & Eugene H., 2006):

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C} \quad (7.12)$$

Keterangan:

W : energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor (dalam satuan joule),

C : kapasitansi kapasitor (dalam satuan farad), dan

V : tegangan yang diterapkan ke kapasitor (dalam satuan volt).

Q : muatan listrik dalam coulomb (C).

Persamaan (7.12) menunjukkan bahwa energi yang tersimpan dalam kapasitor sebanding dengan kapasitansi dan kuadrat tegangan yang diterapkan. Dengan kata lain, semakin besar kapasitansi kapasitor dan semakin tinggi tegangan yang diterapkan, semakin besar energi yang disimpan. Ketika kapasitor terisi, muatan listrik mengalir dari sumber tegangan ke kapasitor sampai tegangan pada kapasitor mencapai nilai yang diberikan oleh sumber tegangan. Selama proses pengisian ini, energi disimpan dalam medan listrik yang terbentuk di antara pelat kapasitor atau dalam ruang dielektrik. Saat kapasitor dikosongkan, muatan listrik yang tersimpan dilepaskan dan mengalir keluar dari kapasitor. Energi yang tersimpan dalam kapasitor digunakan kembali ke dalam sirkuit sebagai energi listrik.

Energi yang tersimpan dalam kapasitor juga dapat diinterpretasikan sebagai potensi listrik. Ketika kapasitor terisi, terdapat potensi listrik yang siap dilepaskan saat kapasitor dikosongkan. Dalam kondisi ideal, ketika tidak ada resistansi atau faktor-faktor lain yang mempengaruhi, energi yang disimpan dalam kapasitor akan tetap sama selama kapasitor tidak dihubungkan atau dilepaskan dari sumber tegangan. Namun, dalam praktiknya, ada beberapa faktor yang dapat menyebabkan kehilangan energi dalam bentuk panas, seperti resistansi internal kapasitor dan efek parasitik dalam sirkuit. Pemahaman tentang energi

yang tersimpan dalam kapasitor penting dalam banyak aplikasi, seperti penyimpanan energi, pengaturan daya, sirkuit pulsa, dan banyak lagi

Kapasitor dengan Dielektrik

Kapasitor dengan dielektrik adalah jenis kapasitor dengan ruang antara pelat-pelat kapasitor diisi dengan bahan dielektrik. Bahan dielektrik ini digunakan untuk meningkatkan kapasitansi kapasitor dan memodifikasi karakteristiknya. Bahan dapat dikelompokkan berdasarkan sifat kelistrikannya menjadi bahan isolator, dielektrik, semikonduktor, dan konduktor. Bahan dielektrik memiliki sifat sulit menghantarkan listrik, dan sering dibahas dalam konteks listrik statis. Bahan dielektrik terbagi menjadi dua jenis, yaitu polar dan non-polar. Molekul dielektrik polar berarti bahwa dalam keadaan tanpa medan listrik, antara elektron dan inti molekul tersebut membentuk dipol. Sementara itu, molekul dielektrik non-polar tidak menunjukkan pemisahan muatan antara elektron dan inti saat tidak ada medan listrik yang ada.

Berikut ini penjelasan lebih lanjut tentang kapasitor dengan dielektrik:

- a. Fungsi dielektrik: bahan dielektrik yang digunakan dalam kapasitor berperan dalam meningkatkan kapasitansi dengan mengurangi medan listrik yang ada di antara pelat-pelat kapasitor. Bahan dielektrik memiliki konstanta dielektrik yang lebih besar daripada konstanta dielektrik vakum. Konstanta dielektrik adalah ukuran sejauh mana bahan dielektrik dapat mengurangi medan listrik. Dengan adanya dielektrik, muatan listrik yang terakumulasi pada pelat-pelat kapasitor bisa lebih besar, sehingga kapasitansi kapasitor meningkat.
- b. Jenis dielektrik: ada berbagai jenis bahan dielektrik yang digunakan dalam kapasitor, termasuk kertas, plastik, keramik, mika, karet, dan banyak lagi. Setiap jenis dielektrik memiliki konstanta dielektrik yang berbeda, yang mempengaruhi kapasitansi kapasitor. Selain itu, sifat fisik dan kimia dielektrik, seperti ketahanan terhadap suhu tinggi atau pelarut tertentu, juga harus dipertimbangkan dalam pemilihan dielektrik yang sesuai.

Tabel 7.1 Nilai permitivitas relatif untuk bahan dielektrik

Bahan	K (F/m)
Udara	1,0006
Alkohol, etil	25
Es	4,2
Karet	2,5-3,0
Plastik	2-4
Paralon (PVC)	7

Sumber: Hayt, 1989 dan Tobing, 1996

- c. Kapasitansi dielektrik: kapasitansi kapasitor dengan dielektrik dapat dihitung (Halliday, D., Resnick, R., dan Walker, J., 2014), dengan menggunakan rumus berikut:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (7.13)$$

Keterangan:

- C : kapasitansi kapasitor (Farad),
 ϵ_0 : permitivitas vakum (konstanta elektrostatik) sebesar 8.854×10^{-12} F/m,
 ϵ_r : konstanta dielektrik bahan dielektrik,
A : luas permukaan pelat kapasitor yang saling berhadapan (m²),
d : jarak antara pelat-pelat kapasitor (m).

- d. Pengaruh dielektrik terhadap kapasitansi: penggunaan dielektrik dalam kapasitor dapat meningkatkan kapasitansi. Konstanta dielektrik bahan dielektrik mempengaruhi seberapa besar peningkatan kapasitansi yang diberikan. Semakin tinggi konstanta dielektrik suatu bahan, semakin besar peningkatan kapasitansi yang dihasilkan.

Selain itu, dielektrik juga dapat mempengaruhi stabilitas tegangan, tahanan terhadap arus searah, dan faktor-faktor lain dalam kapasitor. Ada beberapa faktor yang menyebabkan perbedaan nilai kapasitansi kapasitor dari berbagai bahan dielektrik cair. Faktor-faktor tersebut antara lain suhu, kemurnian bahan dielektrik, adanya bahan dielektrik terlarut dalam cairan dielektrik, kekentalan bahan dielektrik, dan kemampuan bahan dielektrik untuk menguap. Selain faktor-faktor tersebut, kapasitansi kapasitor juga dipengaruhi oleh medan listrik yang diterapkan dan oleh polarisasi bahan dielektrik. Lamanya waktu yang dibutuhkan untuk terjadi polarisasi dan perpindahan muatan listrik dari konduktor yang terhubung dengan muatan positif ke konduktor yang terhubung dengan muatan negatif pada kapasitor juga mempengaruhi nilai kapasitansi. Semakin lama waktu yang dibutuhkan, semakin besar nilai kapasitansi kapasitor tersebut.

Daftar Pustaka

- Giancoli, D. C. (2014). *Physics: Principles with Applications (7th ed.)*. Pearson Education. ISBN: 978-0-321-89740-6.
- Halliday, D., Resnick, R., dan Walker, J. (2014). *Fundamentals of Physics (10th ed.)*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-1-118-23072-5.
- Hayt, W. H., 1989, Elektromagnetika Teknologi, Erlangga, Jakarta.
- <https://www.webstudi.site/2019/02/fungsi-kapasitor-jenis-kapasitor.html>
- <https://fisikahepi.hepidev.com/2021/04/01/kapasitor/>
- <http://betmenfisika.blogspot.com/2015/09/mengenal-kapasitor-si-ember-muatan.html>
- Makarius Sidia, Boni Pahlanop Lapanporoa, Yudha Armana. 2020. Perbandingan Kapasitansi dari Beberapa Jenis Bahan Menggunakan Kapasitor Silinder. *PRISMA FISIKA*, Vol. 8, No. 2 (2020), Hal. 128 - 134. ISSN: 2337-8204
- Resnick, R., dan Halliday, D. (2017). *Physics (10th ed.)*. Wiley. ISBN: 978-1-119-40750-5.
- Young, D. F. dan Freedman, R. A. (2014). *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics (14th ed.)*. Pearson Education, Inc. ISBN: 978-0-321-69686-1

Profil Penulis

Muh. Said L, S.Si., M. Pd



Lahir di Jeneponto, tepatnya tanggal 4 September 1983. Penulis menempuh Pendidikan mulai tingkat SD (1989-1995), SMP (1995-1998), SMA (1998-2001), S1 Fisika (2001-2005) dan S2 Pendidikan Fisika (2007-2009). Sejak tahun 2009 hingga sekarang, penulis aktif sebagai Pengajar di Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar. Penulis membidangi kepakaran dibidang Fisika Kebumihan, Energi dan Lingkungan dan bidang Pendidikan Fisika. Beberapa kegiatan tri darma perguruan tinggi telah aktif dilakukan antara lain dari bidang pengajaran aktif mengajar beberapa mata kuliah yaitu: Pengantar Laboratorium Fisika, Metode Komputasi Fisika, Fisika Dasar, Fisika Matematika, Instrumentasi, Fisika Eksperimen.

Bidang penelitian dan publikasi ilmiah telah banyak dilakukan baik didanai oleh PT UIN Alauddin, maupun bersumber dari Kementerian Agama R.I. Penelitian yang dilakukan antara lain Studi Analisis Koefisien Absorpsi Papan Akustik Pada Ketebalan Bervariasi Berbahan Dasar Limbah Kulit Jagung Dan Sabut Kelapa (Solusi Alternatif Ramah Lingkungan) (2020), Karakterisasi Sifat Fisis Papan Partikel Sabut Kelapa-Serat Pelepah Lontar (2021), Identifikasi Zona Rawan Longsor Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas di Desa Pao Kecamatan Tombolo Pao Kabupaten Gowa (2022). Adapun publikasi ilmiah lainnya yang dihasilkan dalam bentuk Jurnal Terakreditasi dan Prosiding Nasional. Penulis juga telah aktif menulis karya ilmiah buku ber-ISBN. Buku yang terbit terakhir pada tiga tahun terakhir adalah Sistem Pemurni Air Laut Menjadi Air Minum : Sebuah Terobosan dalam Mengatasi Krisis Air Bersih Bagi Komunitas Muslim Pesisir dan Pulau di Sekitar Kota Makassar (2021), Teknik Analisis Data Dan Rambat Ralat Eksperimen Fisika Dasar (Mengasah Psikomotorik Melalui Keterampilan Menganalisis Data Percobaan Fisika), Book Chapter Kinematika Partikel (2023), Book Chapter Fisika Dasar 1 (2023), Book Chapter Pencemaran Lingkungan (2023). Sedangkan tridarma bidang Pengabdian kepada masyarakat juga telah aktif dilakukan perwujudan aktualisasi keilmuan ke masyarakat antara lain: Penerapan Alat Geolistrik Dalam Menentukan Struktur dan Lapisan Air Tanah (Aquifer) Bawah Permukaan di Desa Tino Kec. Tarawang Kab. Jeneponto (2022); Sosialisasi dan Pendampingan Siswa Melalui Pengenalan Praktikum Fisika Lebih Menarik (2022); Pendampingan Siswa SMA Dalam Menumbuhsemangatkan Motivasi, Kreativitas Dan Keterampilan Bereksperimen Melalui Praktikum Fisika di SMA Negeri 2 Bantaeng (2023) Akhirnya karya prestasi ini, penulis dedikasikan kepada masyarakat, bangsa dan negara, semoga apa yang diraih menjadi bermanfaat untuk semuanya.

Email Penulis: muhammad.saidlanto@uin-alauddin.ac.id

ARUS LISTRIK DAN RESISTANSI

Jan Setiawan

Badan Riset dan Inovasi Nasional – Universitas Pamulang

Arus Listrik

Berbicara mengenai kelistrikan ada beberapa istilah umum yang sering disampaikan dan digunakan dalam pembicaraan sehari-hari seperti arus listrik, tegangan listrik dan daya listrik. Dalam sub bab ini akan menekankan pembahasan mengenai arus listrik. Arus listrik merupakan muatan listrik yang bergerak (Knight, 2022; Halliday, Resnick & Walker, 2017). Namun perlu diketahui tidak semua muatan yang bergerak akan menghasilkan arus listrik. Agar terwujudnya arus listrik yang melalui suatu permukaan, diperlukan aliran muatan bersih yang melalui permukaan tersebut. Perlu diketahui bahwa elektron merupakan arus pembawa dalam konduktor. Elektron dalam konduktor sebagai arus pembawa merupakan elektron yang bebas bergerak dan gerakannya acak pada kecepatan yang sangat tinggi hingga orde 10^6 m/s (Halliday, Resnick & Walker, 2017). Elektron bebas tersebut hanya bergerak di dalam konduktor. Elektron bebas ini dapat dikatakan mengalir apabila ada perpindahan muatan bersih yang melewati suatu bidang dalam konduktor. Hal ini dapat terjadi apabila kedua ujung bahan konduktif dihubungkan dengan satu daya sehingga terjadi beda potensial. Arus listrik merupakan perpindahan muatan bersih yang dipertahankan oleh medan listrik internal m). Arus listrik (i) yang melewati suatu bidang didefinisikan sebagai,

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (8.1)$$

Besar muatan q yang melewati suatu bidang dalam kurun waktu tertentu pada rentang 0 hingga t dapat diperoleh dengan integrasi dq dalam persamaan 8.1 menjadi,

$$q = \int dq = \int_0^t i dt \quad (8.2)$$

Satuan Sistem Internasional dari arus listrik adalah coulomb per detik (C/s) atau dikenal sebagai amper (A). Dengan demikian arus listrik sangat dimungkinkan bervariasi terhadap waktu. Arus listrik merupakan besaran skalar, begitu juga untuk muatan listrik dan waktu. Meskipun penggambaran arus listrik dalam suatu konduktor menggunakan panah sebagai ilustrasi arah pergerakan muatan. Perlu diingat panah ini bukan vektor sehingga besaran arus listrik tidak perlu diperlakukan sebagai vektor. Jika pada suatu konduktor mengalir arus listrik i_o yang disisi lainnya memiliki dua cabang, maka arus listrik yang mengalir ditiap cabangnya adalah i_1 dan i_2 . Secara matematis hubungan besaran arus listrik tersebut dapat dituliskan sebagai (Halliday, Resnick & Walker, 2017),

$$i_o = i_1 + i_2 \quad (8.3)$$

Secara umum hukum konservasi muatan yang mengalir melalui percabangan konduktor berlaku jumlah arus listrik yang masuk ke dalam percabangan sama dengan jumlah arus listrik yang keluar dari percabangan yang secara matematis dituliskan sebagai (Knight, 2022),

$$\sum i_{masuk} = \sum i_{keluar} \quad (8.4)$$

Perlu diingat, pengubahan arah atau menekuk konduktor tidak akan mengubah arah aliran muatan di dalamnya. Ilustrasi arus listrik menggunakan panah hanya menunjukkan arah dari aliran sepanjang konduktor, bukan arah di dalam ruangnya. Menurut konvensi penggambaran panah sebagai ilustrasi arus listrik dimulai dari pembawa muatan positif bergerak, meskipun kenyataannya yang mengalir adalah pembawa muatan negatif dan arah alirnya berlawanan (Halliday, Resnick & Walker, 2017). Namun konvensi ini dapat diabaikan dengan menggambarkan pembawa muatan sebenarnya apabila penggambaran dengan pembawa muatan positif memberikan pengaruh yang berbeda.

Rapat Arus Listrik

Aliran elektron yang melalui luasan penampang lintang A disebut dengan rapat arus listrik \vec{J} , yang arahnya sama dengan arah kecepatan

gerakan muatan apabila positif dan berlawanan arah bila bermuatan negatif (Halliday, Resnick & Walker, 2017). Besaran rapat arus merupakan besaran vektor. Hubungan arus listrik dengan rapat arus listrik dituliskan sebagai,

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (8.5)$$

Besar nilai dari J sebanding dengan arus listrik per satuan luasan dari penampang lintang konduktor, yang dapat dituliskan sebagai,

$$J = \frac{i}{A} \quad (8.6)$$

Satuan Sistem Internasional untuk rapat arus listrik adalah amper per satuan luas (A/m^2). Untuk pembawa muatannya elektron, rapat arus listrik dapat dituliskan menjadi,

$$J = \frac{i}{A} = n_e e v_d \quad (8.7)$$

dengan e adalah muatan elektron, n_e adalah kerapatan elektron konduksi dalam bahan konduktor dan v_d adalah kelajuan elektron konduksi (Kumar, 2013; Knight, 2022).

Resistansi, Resistivitas, dan Resistor

Apabila konduktor yang berbeda jenis bahannya namun memiliki geometri yang sama kemudian diberikan beda potensial arus listrik mengalir akan menghasilkan nilai yang berbeda. Hal ini dikarenakan pada bahan konduktor memiliki hambatan (resistansi) listrik. Sedangkan karakteristik intrinsik bahan konduktor terkait hambatan listrik dikenal sebagai hambatan jenis (resistivitas). Resistansi listrik R pada konduktor dapat ditentukan dari hubungan beda potensial V yang diberikan dan arus listrik i yang dihasilkan sebagai berikut (Halliday, Resnick dan Walker, 2017; Knight, 2022),

$$R = \frac{V}{i} \quad (8.8)$$

Satuan Sistem Internasional untuk resistansi listrik untuk persamaan 8.7 adalah volt per amper (V/A) atau sering juga digantikan dengan satuan ohm dengan simbol Ω . Komponen elektronika yang didesain khusus

untuk memberikan resistansi listrik tertentu disebut resistor (Gibilisco & Monk, 2016). Resistor ini akan dibahas pada sub bab berikutnya. Dari persamaan 8.7 terlihat semakin besar nilai resistansi listrik pada konduktor yang diberikan beda potensial yang sama akan menghasilkan arus listrik yang lebih kecil.

Resistivitas listrik ρ dari bahan konduktor menunjukkan seberapa besar pergerakan elektron sebagai respons adanya medan listrik. Besaran yang nilainya kebalikan dari resistivitas adalah konduktivitas listrik. Besaran dari resistivitas listrik pada konduktor dapat dilihat dari hubungan antara medan magnetik dengan rapat arus pada titik tertentu dalam konduktor yang dituliskan sebagai berikut (Halliday, Resnick & Walker, 2017; Knight, 2022),

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (8.9)$$

sehingga satuan resistivitas listrik dari hubungan ini adalah V/m untuk E dan A/m^2 untuk J menjadi V/A dan dapat dituliskan sebagai $\Omega.m$ (ohm – meter). Hubungan resistivitas dan resistansi yang dipengaruhi luas penampang dan panjang konduktor dapat ditentukan sebagai berikut,

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{V/L}{i/A} = R \frac{A}{L} \quad (8.10)$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (8.11)$$

Pada persamaan 8.11 diberikan besaran resistansi listrik yang diperoleh dari resistivitas listrik, luas penampang dan panjang konduktor. Kebalikan dari resistivitas listrik dikenal dengan konduktivitas listrik σ yang dituliskan pada persamaan 8.12 dengan satuannya adalah $(\Omega.m)^{-1}$.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (8.12)$$

Nilai resistivitas listrik konduktor dapat dipengaruhi oleh temperatur. Secara umum temperatur akan mempengaruhi besaran resistivitas listrik secara linear, di mana semakin tinggi temperatur akan semakin tinggi juga resistivitas listriknya. Secara empirik pengaruh temperatur

terhadap nilai resistivitas listrik diberikan pada persamaan berikut (Halliday, Resnick & Walker, 2017),

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0) \quad (8.13)$$

Temperatur T_0 merupakan temperatur referensi yang diketahui nilai resistivitas listrik ρ_0 . Sedangkan α adalah nilai koefisien temperatur dari resistivitas. Nilai temperatur yang diberikan pada persamaan 8.13 boleh menggunakan satuan Celcius maupun Kelvin, karena dalam persamaan tersebut digunakan selisih temperaturnya. Dengan demikian apabila temperatur semakin rendah, akan membuat resistivitas konduktor akan menurun. Karakteristik resistivitas dan koefisien temperatur beberapa bahan diberikan pada Tabel 8.1

Tabel 8.1 Nilai resistivitas dan koefisien temperatur dari resistivitas (Halliday, Resnick & Walker, 2017)

Bahan	Resistivitas ρ ($\Omega.m$)	koefisien temperatur dari resistivitas α (K^{-1})
Perak	$1,62 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-3}$
Tembaga	$1,69 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-3}$
Emas	$2,35 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-3}$
Aluminium	$2,75 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-3}$
Besi	$9,68 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Tungsten	$5,25 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Silikon murni	$2,5 \times 10^3$	-70×10^{-3}

Untuk bahan konduktor yang pada kondisi tertentu akan kehilangan seluruh resistansinya dikenal memiliki sifat superkonduktivitas.

Hukum Ohm

Dalam pembahasan sebelumnya sudah dituliskan hubungan antara arus listrik, beda potensial listrik dan hambatan listrik. Hukum Ohm menyatakan bahwa arus listrik yang melalui sebuah konduktor sebanding dengan beda potensial yang diberikan (Halliday, Resnick & Walker, 2017; Knight, 2022). Secara matematis serupa dengan persamaan 8.8 yang dituliskan dalam bentuk,

$$i = \frac{\Delta V}{R} \quad (8.14)$$

Konduktor yang memenuhi hukum Ohm ketika resistansi dari konduktor tidak dipengaruhi oleh besar dan polaritas dari beda potensial yang diberikan. Konduktor inipun resistivitasnya tidak dipengaruhi oleh besar dan arah dari medan listrik yang diberikan. Secara umum konduktor dari bahan logam, semikonduktor memenuhi hukum Ohm pada rentang nilai medan listrik yang relatif lebar. Namun perlu dipahami, Ketika medan listrik yang diberikan terlalu tinggi, umumnya konduktor gagal memenuhi hukum Ohm.

Soal Latihan

1. Tentukan muatan listrik dalam konduktor apabila selama kurun waktu 4,0 menit mengalir arus listrik sebesar 5,0?
2. Arus yang mengakir pada bohlam lampu 100 W sebesar 0,85 A. Apabila diameter filamen dalam bohlam lampu sebesar 0,25 mm, tentukan
 - a. Kerapatan arus dalam filamen.
 - b. Arus elektron dalam filamen.
3. Arus listrik yang mengalir dalam sebuah pemanas sebesar 12,0 A. Berapa banyak elektron yang mengalir ke pemanas selama 3,0 menit?
4. Terdeteksi arus listrik $1,2 \times 10^{-10}$ A pada kawat tembaga berdiameter 2,5 mm. jumlah muatan pembawa per satuan volume diketahui sebesar $8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Dengan asumsi arus listrik homogen, tentukan rapat arus dan kelajuan elektron pembawanya.
5. Dalam kawat konduktor yang terbuat dari emas yang diameter 1,0 mm memiliki kelajuan elektron konduksi sebesar $5,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Berapa lama waktu yang diperlukan 1 mol elektron untuk mengalir pada penampang lintang permukaan konduktor tersebut?
6. Dalam waktu 2 ms, sebanyak $5,1 \times 10^{17}$ elektron mengalir dengan kelajuan elektron konduksi sebesar 0,75 mm/s menembus penampang lintang bidang konduktor berbentuk persegi $2,0 \text{ mm} \times 2,0 \text{ mm}$. Tentukan jenis logam dari konduktor tersebut?
7. Besar medan listrik pada kawat tembaga dengan bentuk persegi $1,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$ sebesar 0,042 V/m. Tentukan besar arus listrik dalam kawat tersebut?

8. Pada kawat konduktor yang berdiameter 3,0 mm mengalir arus listrik sebesar 12 A pada saat diberikan medan listrik sebesar 0,085 V/m. Tentukan resistivitas kawat tersebut?
9. Tentukan resistansi dari
 - a. Sebuah kawat emas sepanjang 2,0 m dengan diameter 0,20 mm?
 - b. Sebuah benda dari bahan karbon sepanjang 10 cm dengan bentuk penampang lintang persegi dengan ukuran $1,0 \text{ cm} \times 1,0 \text{ cm}$?
10. Berapa panjangkah yang diperlukan kawat aluminium dengan diameter 0,60 mm agar mengalir arus listrik 0,50 A pada saat diberi beda potensial 1,5 V? Apabila hanya setengah dari panjang dari diketahui, berapakah arus listrik yang mengalir pada saat ini?
11. Sebuah kawat sepanjang 4,00 m dengan diameter 6,00 mm memiliki resistansi $15,0 \text{ m}\Omega$. Apabila diberikan beda potensial sebesar 23,0 V pada kawat tersebut. (a) Tentukan arus listrik dalam kawat, (b) berapa besar rapat arus dalam kawat, dan (c) hitung resistivitas bahan kawat tersebut.
12. Pada kawat tembaga sepanjang 2,00 cm dengan jari-jari 2,00 mm diberikan beda potensial sebesar 3,00 nV. Tentukan arus listrik yang mengalir pada kawat tersebut!

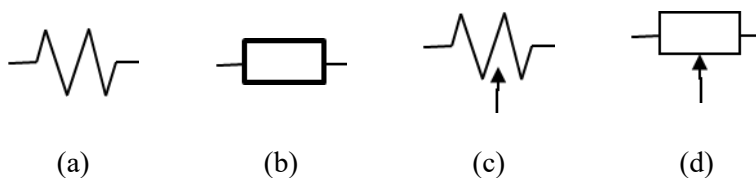
Rangkaian Resistor

Telah diketahui resistor merupakan komponen elektronika yang didesain khusus untuk memberikan resistansi listrik tertentu. Dalam rangkaian listrik, komponen resistor berperan sebagai pembagi tegangan, pembatas arus, penyesuai impedansi dan pembuang daya. Komponen resistor terdiri atas resistor dengan nilai resistansi tetap dan variabel. Pada resistor dengan nilai resistansi tetap, nilai intrinsik resistansinya tidak berubah dalam rentang pemakaian tertentu. Ada beberapa bentuk komponen resistor tetap ini, yaitu (Bird, 2022):

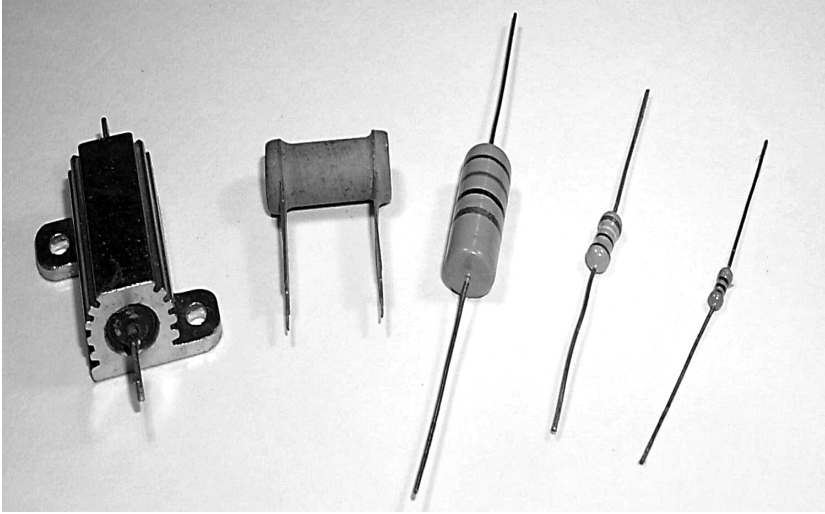
1. Resistor karbon: resistor ini berisi serbuk karbon yang dicampurkan dengan padatan atau pasta non konduktif dibentuk menjadi silinder dan diberi kawat pada kedua ujungnya. Nilai resistansi dari resistor ini bergantung rasio karbon dengan bahan non konduktifnya, dan juga jarak antara kawat yang dipasang dikedua ujungnya.

2. Resistor gulungan kawat: dibentuk dari kawat yang tidak terlalu konduktif. Kawat ini dapat disusun berupa gulungan pada suatu benda silinder. Nilai resistansinya bergantung pada sifat kelistrikan kawat, dengan diameter dan panjang tertentu. Resistor ini memiliki kemampuan untuk menangani daya yang besar dan memiliki toleransi yang ketat. Namun karena tersusun dari gulungan kawat, kelemahannya ketika bekerja dengan frekuensi tinggi AC atau frekuensi radio.
3. Resistor film: dapat berasal dari pasta karbon, kawat resistif atau paduan keramik dan logam untuk membentuk silinder sebagai sebuah film atau lapisan tipis untuk memperoleh resistansi tertentu. Bentuknya sangat mirip dengan resistor karbon, namun konstruksi komponennya berbeda. Resistor film dapat dibuat hingga memiliki toleransi yang ketat, dan dapat bekerja pada frekuensi tinggi AC atau frekuensi radio. Namun kelemahannya adalah pada kurang mampunya menangani daya yang tinggi.
4. Resistor rangkaian terpadu: pada rangkaian terpadu yang berbasis silicon sangat dimungkinkan untuk membuat lapisan resistor pada permukaannya. Ketebalan lapisan resistif, dan jenis dan konsentrasi impuritas yang ditambahkan akan menentukan resistansi rangkaian terpadunya. Ukuran komponen yang kecil, komponen ini hanya mampu menangani daya yang rendah.

Selanjutnya adalah resistor variabel atau dikenal dengan potensiometer, resistor ini adalah memiliki resistansi yang dapat disesuaikan. Resistor inipun memiliki beberapa desain. Sebagian besar potensiometer hanya mampu menangani arus listrik yang rendah, pada tagangan yang tidak telalu tinggi. Dalam rangkaian listrik, komponen resistor diberi simbol seperti pada Gambar 8.1 dan ilustrasi komponen resistor diberikan pada Gambar 8.2.



Gambar 8.1 Simbol (a) dan (b) untuk resistor tetap, dan (c) dan (d) untuk resistor variabel.



Gambar 8.2 Komponen Resistor (Bird, 2022).

Satuan dari resistor adalah ohm (Ω). Resistor yang diproduksi memiliki nilai dan kelipatan pangkat 10 dari 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2 (Gibilisco, & Monk, 2016). Dipasaran dapat diperoleh resistor dengan resistansi sebesar 3,3 Ω ; 400 Ω ; atau 8,2 k Ω dan lainnya sesuai nilai yang sudah disebutkan. Selain itu komponen resistor memiliki nilai resistansi toleransi, yang menunjukkan besar rentang nilai resistansinya. Toleransinya disebutkan dalam persentase 1, 2, 5, 10 dan 20%. Untuk resistor 1,0 k $\Omega \pm 2\%$ akan memiliki nilai resistansi berkisar dari 980 sampai 1020 Ω . Telah disebutkan komponen resistor dapat digunakan sebagai pembuang daya, dalam produksinya komponen ini diberi batasan besar daya yang dapat dibuangnya dengan aman. Resistor akan secara kontinu membuang daya sebesar nilainya. Besaran daya yang dapat dibuang dapat dihitung dari hubungan daya, arus, beda potensial dan hambatan listrik sebagai berikut,

$$P = V \cdot i = (i \cdot R) \cdot i = i^2 \cdot R = (V/R)^2 \cdot R = V^2/R \quad (8.15)$$

$$i = (P/R)^{1/2} \quad (8.16)$$

sehingga dalam aplikasinya, untuk menyusun rangkaian resistor dengan kemampuan daya yang lebih besar dapat menyusun resistor dengan daya yang rendah secara seri maupun parallel dengan matriks 2 \times 2, 3 \times 3, 4 \times 4, atau yang lebih besar. Perlu diingat dalam penggunaan resistor, perlu memberikan batas keamanan paling tidak 10% dari nilai daya maksimum dalam penggunaannya. Jadi ketika memiliki resistor dengan

kemampuan 1 W, dipakai tidak lebih dari 0,9 W (Gibilisco, & Monk, 2016). Identifikasi resistor bermacam-macam, salah satu yang umum untuk resistor berbentuk silinder diberikan kode warna pada badannya untuk memberi informasi nilai resistansi, toleransi dan koefisien temperatur. Gelang warna pada badan resistor dapat terdiri 4, 5 atau 6 buah. Kode warna pada resistor diberikan pada Tabel 8.2

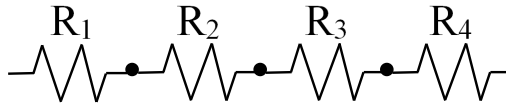
Tabel 8.2 Kode warna resistor (Bird, 2022)

	4 gelang warna ke 1 dan 2	4 gelang warna ke 3	4 gelang warna ke 4	
	5 gelang warna ke 1, 2 dan 3	5 gelang warna ke 4	5 gelang warna ke 5	
	6 gelang warna ke 1, 2 dan 3	6 gelang warna ke 4	6 gelang warna ke 5	6 gelang warna ke 6
Warna	Nilai	Pengali	Toleransi	Koefisien temperatur
Hitam	0	1		
Coklat	1	10	1%	100 ppm
Merah	2	100	2%	50 ppm
Jingga	3	1k		15 ppm
Kuning	4	10k		25 ppm
Hijau	5	100k	0,5%	
Biru	6	1M	0,25%	
Ungu	7	10M	0,1%	
Abu-abu	8		0,05%	
Putih	9			
Emas		0,1	5%	
Perak		0,01	10%	
Tanpa warna			20%v	

Sebagai contoh apabila ada resistor yang memiliki 6 gelang warna dengan urutan, hijau, biru, hitam, coklat, merah, merah arti dari warna gelang tersebut adalah 5600 Ω , dengan toleransi 2% dan koefisien temperaturnya 50 ppm. Untuk resistor yang tidak menggunakan gelang warna, kode toleransi menggunakan huruf besar B = 0,1%, C = 0,25%, D = 0,5%, F = 1%, G = 2%, J = 5%, K = 10% dan M = 20%. Selain itu untuk penulisan besar resistansi resistor yang berjenis rangkaian terpadu bertuliskan misalkan 822 yang artinya 8,2 k Ω , sedangkan untuk 4R7 artinya 4,7 Ω .

Rangkaian Seri

Rangkain seri dari resistor adalah susunan resistor yang menghubungkan satu kaki dengan kaki dari resistor lain dan satu kaki lainnya ke kakai resistor yang berbeda. Ilustrasi susunan rangkaian seri dari resistor diberikan oleh Gambar 8.3.



Gambar 8.3 Rangkaian seri resistor.

Pada Gambar 8.3 diberikan empat buah resistor yang tersusun secara seri. Susunan dari rangkaian resistor ini dapat digantikan atau disederhanakan dengan satu resistor pengganti. Perhitungan nilai resistansi untuk resistor pengganti pada rangkaian seri diberikan sebagai berikut,

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (8.17)$$

Dalam rangkaian seri ini, resistor berperan sebagai pembagi tegangan (Rizzoni, & Kearns, 2022). Arus listrik yang masuk ke dalam susunan ini akan memiliki besar yang sama. Dari hubungan arus listrik, hambatan, dan tegangan akan diperoleh tegangan yang berbeda-beda pada tiap resistor bergantung nilai resistansinya. Sebagai contoh pada Gambar 8.4 diberikan rangkaian seri resistor yang dialiri arus listrik sebesar 2 mA.



Gambar 8.4 Rangkaian seri resistor yang dialiri arus listrik sebesar 2 mA.

Pada tiap resistor akan memiliki beda potensial,

1. $R = 1\text{k}\Omega$; $V = 0,002 \times 1000 = 2 \text{ V}$
2. $R = 2\text{k}\Omega$; $V = 0,002 \times 2000 = 4 \text{ V}$
3. $R = 4\text{k}\Omega$; $V = 0,002 \times 4000 = 8 \text{ V}$
4. $R = 3\text{k}\Omega$; $V = 0,002 \times 3000 = 6 \text{ V}$

Beda potensial pada kedua ujung rangkaian seri tersebut adalah penjumlahan dari $2 + 4 + 8 + 6 = 20 \text{ V}$. Apabila dilakukan terlebih

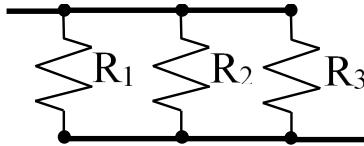
dahulu menghitung resistor pengganti untuk rangkaian seri tersebut, langkahnya sebagai berikut,

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 1000 + 2000 + 4000 + 3000 = 10000$$

Diperoleh resistor penggantinya sebesar 10 kΩ, yang beda potensial diujung resistor pengganti ini adalah $0,002 \times 10000 = 20 \text{ V}$.

Rangkaian Paralel

Pada rangkaian paralel susunan beberapa resistor tiap satu sisi kakinya dihubungkan bersama-sama dan kaki lainnya juga dihubungkan bersama-sama. Ilustrasi rangkaian paralel diberikan pada Gambar 8.5

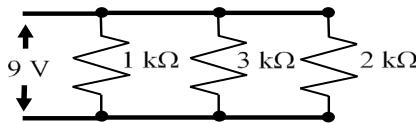


Gambar 8.5 Rangkaian paralel resistor.

Seperti pada rangkaian seri, dari rangkaian inipun dapat diberikan resistor pengganti. Nilai dari resistor pengganti untuk rangkauan paralel sebagai berikut,

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \tag{8.18}$$

Dalam rangkaian paralel tiap resistor akan berperan sebagai pembagi arus. Arus listrik yang masuk kepercabangan akan terbagi sebanding dengan nilai resistansi tiap resistor dan arus listrik keluar dari percabangan dengan nilai yang sama seperti pada saat masuk ke percabangan (Rizzoni, & Kearns, 2022). Tegangan pada tiap resistor dalam rangkaian paralel bernilai sama. Sebagai contoh pada Gambar 8.6 diberikan rangkaian paralel resistor yang diberi beda potensial 9 V akan ditentukan arus yang mengalir ditiap resistornya.



Gambar 12.6 Rangkaian paralel yang diberi beda potensial sebesar 9 V.

Langkah pertama adalah menentukan resistor pengganti untuk rangkaian tersebut.

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} = 1 + \frac{5}{6} = \frac{11}{6}$$

dengan demikian nilai $R_p = 6/11 \text{ k}\Omega$. Besar arus yang mengalir adalah,

$$i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{9}{6/11 \cdot 1000} = \frac{99}{6000} = 0,0165$$

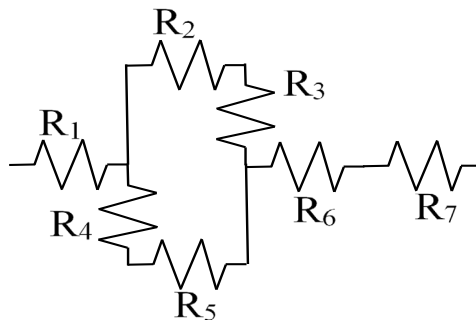
diperoleh arus listrik yang mengalir dalam rangkaian tersebut sebesar 16,5 mA. Diketahui beda potensial pada tiap resistor sama besarnya dengan beda potensial yang diberikan sehingga besar arus listrik di tiap resistor dapat ditentukan sebagai berikut,

1. $i_1 = 9 / 1 \text{ k}\Omega = 0,009 \text{ A} = 9 \text{ mA}$
2. $i_2 = 9 / 3 \text{ k}\Omega = 0,003 \text{ A} = 3 \text{ mA}$
3. $i_3 = 9 / 2 \text{ k}\Omega = 0,045 \text{ A} = 4,5 \text{ mA}$

Apabila dijumlahkan besar arus listrik dalam rangkaian paralel adalah $9 + 3 + 4,5 = 16,5 \text{ mA}$.

Rangkaian Kombinasi

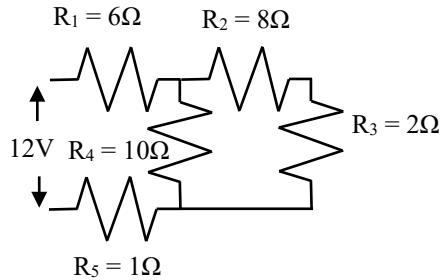
Dalam praktiknya banyak susunan rangkaian resistor yang merupakan kombinasi dari susunan seri maupun susunan paralel. Ilustrasi dari rangkaian kombinasi ini diberikan pada Gambar 12.7.



Gambar 8.7 Rangkaian kombinasi resistor.

Dalam rangkaian kombinasi ini, rangkaian pengganti dilakukan bertahap dilakukan proses pengubahan rangkaian pengganti sesuai bentuk dasarnya apakah rangkaian seri atau rangkaian paralel. Sebagai

contoh pada Gambar 8.8 diberikan rangkaian kombinasi yang diberi beda potensial sebesar 12 V. Dari rangkaian ini akan ditentukan arus listrik dalam rangkaian dan arus listrik yang mengalir maupun beda potensial di tiap resistor.



Gambar 8.8 Rangkaian kombinasi resistor yang diberi beda potensial sebesar 12 V.

Rangkaian kombinasi dalam Gambar 8.8 dapat disederhanakan menjadi sebuah resistor pengganti untuk menentukan berapa besar arus listrik yang mengalir dalam rangkaian. Bila diperhatikan pada R_2 dan R_3 maka resistor pengganti R_{s1} untuk kedua resistor tersebut ditentukan menggunakan perumusan susunan seri. Kemudian R_4 dengan R_{s1} akan menjadi susunan paralel dengan resistor pengganti R_p . Resistor pengganti R_{s2} merupakan susunan seri dari R_1 , R_p dan R_5 . Secara matematis proses penentuan resistor pengganti sebagai berikut,

1. Menentukan R_{s1}

$$R_{s1} = R_2 + R_3 = 8 + 2 = 10, \text{ diperoleh } R_{s1} = 10 \Omega$$

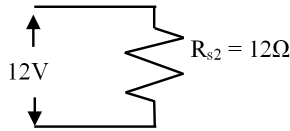
2. Menentukan R_p

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{10} + \frac{1}{10} = \frac{2}{10}, \text{ diperoleh } R_p = 5 \Omega$$

3. Menentukan R_{s2}

$$R_{s2} = R_1 + R_p + R_5 = 6 + 5 + 1 = 12, \text{ diperoleh } R_{s2} = 12 \Omega$$

Resistor pengganti untuk rangkaian pada Gambar 12.8 adalah $R_{s2} = 12 \Omega$ yang rangkaiannya diilustrasikan menjadi,

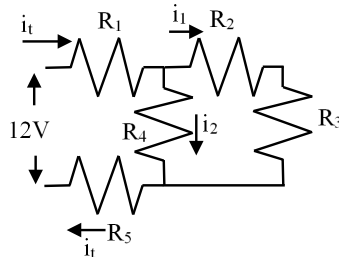


Gambar 8.9 Rangkaian kombinasi resistor dari Gambar 12.8 yang diganti dengan resistor pengganti R_{s2} .

Selanjutnya arus listrik total i_t dalam rangkaian adalah

$$i_t = \frac{V}{R_{s2}} = \frac{12}{12} = 1 \quad , \text{diperoleh } i_t = 1 \text{ A}$$

Dengan demikian, arus yang mengalir di tiap resistor dapat diilustrasikan pada Gambar 8.10 sebagai berikut,



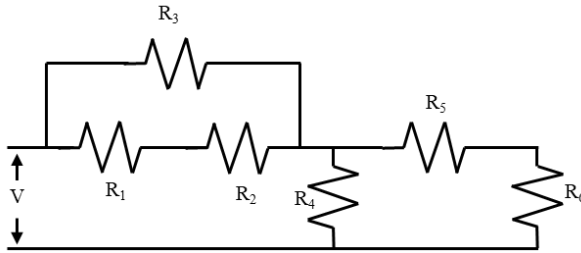
Gambar 8.10 Aliran arus listrik dalam rangkaian.

Arus listrik yang melalui R_1 dan R_5 sebesar $i_t = 1$ A. Dengan demikian tegangan pada R_1 yaitu $V_1 = 6 \times 1 = 6$ V. Sedangkan pada R_5 yaitu $V_5 = 1 \times 1 = 1$ V. Terlihat distribusi tegangan sudah terbagi pada resistor R_1 dan R_5 sebesar 7 V, tentunya pada R_p yang nilainya sebesar 5Ω akan terukur beda potensial sebesar 5 V. Dari beda potensial ini dapat ditentukan besar arus listrik yang mengalir pada R_2 , R_3 dan R_4 . Pada R_4 , besar arus i_2 adalah $5 / 10 = 0,5$ A. Dengan hubungan $i_t = i_1 + i_2$, dapat diperoleh nilai $i_1 = 0,5$ A. Arus listrik yang mengalir pada R_2 dan R_3 nilainya sama besar karena keduanya tersusun secara seri. Beda potensial pada R_2 sebesar $0,5 \times 8 = 4$ V dan pada R_3 sebesar $0,5 \times 2 = 1$ V.

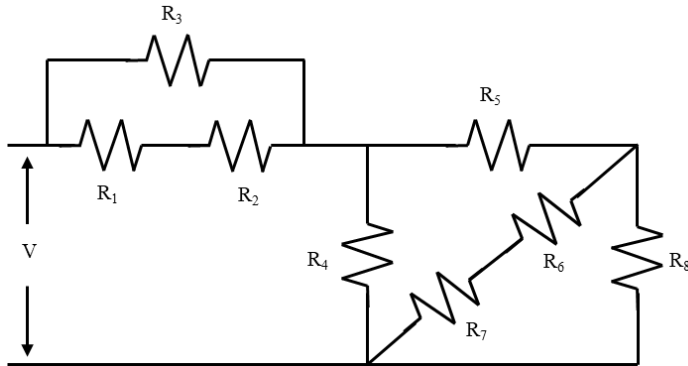
Dalam rangkaian kombinasi ada kalanya tidak bisa langsung disederhanakan ke rangkaian seri maupun paralel. Untuk rangkaian kombinasi seperti itu dimungkinkan untuk menentukan resistor pengganti Thévenin atau Norton (R_T atau R_N) (Rizzoni & Kearns, 2022).

Soal Latihan

1. Dari Gambar berikut tentukanlah arus listrik yang mengalir dalam rangkaian dan tentukan arus listrik dan tegangan yang melalui tiap resistor, apabila diketahui $V = 12 \text{ V}$, $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $R_3 = 3\Omega$, $R_4 = 8\Omega$, $R_5 = 3\Omega$, $R_6 = 5\Omega$



2. Dari Gambar berikut tentukanlah arus listrik yang mengalir dalam rangkaian dan tentukan arus listrik dan tegangan yang melalui tiap resistor, apabila diketahui $V = 15 \text{ V}$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 8\Omega$, $R_3 = 9\Omega$, $R_4 = 18\Omega$, $R_5 = 5\Omega$, $R_6 = 4\Omega$, $R_7 = 2\Omega$, $R_8 = 12\Omega$.



Daftar Pustaka

- Bird, J. (2022). *Bird's Electrical and Electronic Principles and Technology*. Routledge.
- Gibilisco, S., & Monk, S. (2016). *Teach yourself electricity and electronics*. McGraw-Hill Education.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2017). *Fundamentals of Physics, Extended, 11ed*. John Wiley & Sons.
- Knight, R. D. (2022). *Physics for scientists and engineers*. Pearson Education, Limited.
- Kumar, K. S. (2013). *Electric circuit analysis*. Pearson Education India.
- Rizzoni, G. & Kearns, J. (2022). *Principles and applications of electrical engineering*. McGraw-Hill Higher Education.

Profil Penulis



Dr. Jan Setiawan, S.Si, M.Si

Penulis lahir di Jakarta pada tahun 1980. Saat ini penulis adalah staf Peneliti Ahli Madya pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis menyelesaikan studi S1 di prodi Fisika Institut Pertanian Bogor pada tahun 2003. Studi S2 di prodi Ilmu Bahan-bahan Universitas Indonesia diselesaikan oleh Penulis pada tahun 2010. Tahun 2015, Penulis menyelesaikan studi S3 di prodi Ilmu Bahan-bahan Universitas Indonesia. Bidang kepakaran penelitian Penulis adalah teknik material. Selain berkarir sebagai peneliti Penulis juga aktif menjadi pengajar pada Program Studi Teknik Elektro - Universitas Pamulang. Penulis juga aktif menjadi editor untuk jurnal ilmiah nasional dan mitra bestari untuk jurnal ilmiah baik nasional maupun internasional. Penulis mulai berkecimpung dalam penulisan buku untuk bidang MIPA dan keteknikan semenjak tahun 2020.

Email Penulis: jansetiawan.lecturer@gmail.com

RANGKAIAN LISTRIK SEARAH

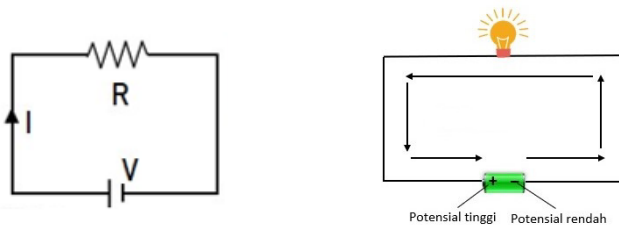
Nurul Fuadi

Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

Pada bab ini kita akan mulai dengan mempelajari sumber tegangan listrik searah, arus searah dan rangkaian arus searah.

Sumber tegangan listrik searah

Apakah anda tahu darimana saja sumber listrik? Listrik bisa berasal dari baterai, generator, dan petir. Selain baterai, sumber tegangan listrik juga dapat dihasilkan oleh accu dan sel surya. Beda potensial adalah tegangan yang bekerja pada komponen dari satu terminal/kutub ke terminal/kutub lainnya. Adanya perbedaan potensial ini yang dapat menggerakkan muatan listrik. Jika kutub-kutub dihubungkan ke rangkaian, maka arus listrik mengalir keluar dari kutub yang memiliki potensial lebih tinggi, menuju rangkaian, dan mengalir masuk ke kutub yang memiliki potensial lebih rendah. Kutub yang potensialnya lebih tinggi sering disebut kutub positif dan kutub yang potensialnya lebih rendah disebut kutub negatif. Simbol kutub atau terminal tampak dalam Gambar 9.1



Gambar 9.1 Simbol dan rangkaian tegangan listrik arus searah (DC)

Persamaan beda potensial listrik

$$V = I \cdot R \quad (9.1)$$

V = Beda potensial listrik (Volt)

I = Arus Listrik (Ampere)

R = Hambatan listrik (ohm)

Arus Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai kecepatan aliran muatan. Arus yang besar, seperti yang digunakan untuk menghidupkan mesin truk, memindahkan sejumlah besar muatan dalam waktu singkat, sedangkan arus kecil, seperti yang digunakan untuk mengoperasikan kalkulator genggam, memindahkan sejumlah kecil muatan dalam waktu yang lama periode waktu. Dalam bentuk persamaan, arus listrik I didefinisikan sebagai berikut

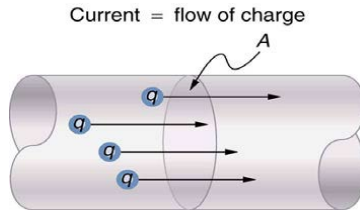
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (9.2)$$

di mana ΔQ adalah jumlah muatan yang melewati area tertentu dalam waktu Δt . Muatan listrik dapat mengalir dari satu tempat ke tempat lain karena adanya beda potensial. Benda yang memiliki potensial tinggi memberikan muatan ke tempat yang memiliki potensial rendah. Besarnya arus yang mengalir berbanding lurus dengan beda potensial V , antara dua tempat, atau $I \propto V$. Pernyataan selanjutnya dapat ditulis

$$I = \frac{1}{R} V \quad (9.3)$$

dimana R didefinisikan sebagai hambatan listrik antara dua titik. Hambatan listrik atau resistansi adalah kemampuan suatu benda mencegah atau menghambat aliran arus listrik. Makin besar R maka arus listrik makin sulit mengalir yang ditandai dengan arus yang makin kecil. Satuan hambatan listrik adalah Ohm biasanya ditulis dalam lambang Ω .

Arus Searah atau dalam bahasa Inggris disebut dengan Direct Current yang disingkat dengan DC. Satuan SI untuk arus adalah ampere (A), yang diambil dari nama fisikawan Prancis André-Marie Ampère (1775-1836). Ampere adalah aliran satu coulomb melalui suatu area dalam satu detik. Karena $I = \Delta Q / \Delta t$, kita menyatakan bahwa satu ampere sama dengan satu coulomb per detik $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$



Gambar 9.2 Laju aliran muatan menghasilkan arus listrik
(Sumber: college physics, textbook Equity Edition, 2013)

Usaha, Energi dan GGL Induksi

Jika sebuah partikel bermuatan dalam ruang yang mengandung medan listrik maka partikel yang mula-mula diam akan bergerak. Ini menunjukkan partikel mengalami pertambahan energi kinetik yang semula nol menjadi tidak nol. Jika tidak ada gaya luar yang diberikan pada muatan, maka penambahan energi kinetik akan diikuti oleh pengurangan energi bentuk lain, akibatnya energi total konstan (hukum kekekalan energi). Energi bentuk lain yang paling mungkin dimiliki partikel tersebut adalah energi potensial. Perubahan energi potensial sama dengan negatif usaha yang dilakukan pada gaya konservatif. Gaya listrik termasuk gaya konservatif sehingga kita dapat mendefinisikan energi potensial pada gaya listrik. Selanjutnya mari menentukan persamaan energi potensial listrik

Misalkan muatan listrik q berada dalam ruang yang memiliki medan listrik $\mathbf{E}(\mathbf{r})$. Gaya yang dialami muatan tersebut adalah

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (9.4)$$

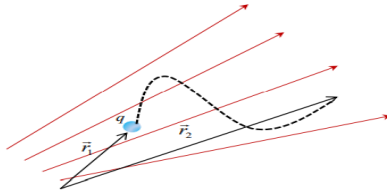
Dengan demikian, kerja yang dilakukan untuk memindahkan muatan dari posisi \mathbf{r}_1 ke posisi \mathbf{r}_2 adalah $W_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r}$

$$W_{12} = q \int_{r_1}^{r_2} E(r) \cdot dr$$

Dengan menggunakan definisi bahwa kerja oleh gaya konservatif = negatif perubahan energi potensial maka dapat dituliskan

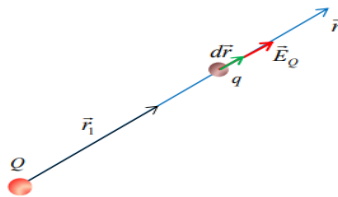
$$\Delta U = -\Delta W_{12}$$

$$U(r_2) - U(r_1) = -q \int_{r_1}^{r_2} E(r) \cdot dr \quad (9.5)$$



Gambar 9.3 Muatan dipindahkan dari r_1 ke posisi r_2 yang berada dalam ruang yang mengandung medan listrik. (sumber: Abdullah, M. 2017)

Selanjutnya kita tinjau energi potensial sebuah partikel yang bermuatan q yang berada pada jarak r dari muatan lain Q (gambar 9.3)



Gambar 9.4 Energi potensial muatan q di sekitar muatan Q (sumber: Mikrajuddin A. 2017)

Pada gambar diatas terlihat kedua muatan sama-sama berupa titik. Kuat medan listrik di sekitar muatan Q dapat dihitung dengan mudah menggunakan hukum Coulomb

$$\mathbf{E}_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (9.6)$$

Dengan demikian energi potensial yang dimiliki muatan q adalah

$$U(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r}_1) - q \int_{r_1}^r \mathbf{E}_Q \cdot d\mathbf{r}$$

karena \mathbf{E}_Q dan $d\mathbf{r}$ sejajar (membentuk Sudut 0°) maka $\mathbf{E}_Q \cdot d\mathbf{r} = E_Q dr \cos 0^\circ = E_Q dr$. Sehingga persamaan sebelumnya dapat ditulis kembali

$$U(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r}_1) - q \int_{r_1}^r \mathbf{E}_Q dr$$

$$U(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r}_1) - \int_{r_1}^r q \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \right) dr$$

$$U(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r}_1) - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r^2}$$

Setelah r diintegrasikan sedemikian rupa dan dengan mengambil titik acuan pada jarak tak berhingga, $r_1 = \infty$, dan potensialnya ditetapkan sama dengan nol, $U(\infty) = 0$ maka didapatkan hasil

$$U(\mathbf{r}) = 0 - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\infty} - \frac{1}{r} \right]$$

$$U(\mathbf{r}) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \quad (9.7)$$

Dapat disimpulkan bahwa energi potensial sebuah muatan q dalam medan yang dihasilkan muatan lain yang berbentuk titik berbanding terbalik dengan jarak.

Fluks magnetik

Satu lagi bahan yang bisa menghasilkan listrik yang sering kita temukan disekitar kita, yaitu magnet. Medan magnet bisa berubah jadi sumber listrik melalui perubahan fluks, dengan cara mendekatkan atau menjauhkan magnet ke suatu kumparan/lilitan kabel listrik. Inilah yang disebut dengan induksi elektromagnetik. Fenomena ini dikemukakan oleh *Michael Faraday* yang menyatakan bahwa “ketika magnet diam, tidak ada listrik yang mengalir. Tapi ketika magnet bergerak mendekat atau menjauh, muncul arus listrik yang mengalir”. Penemuannya ini dianggap sebagai penemuan monumental karena memiliki penting dalam penjelasan teoritis tentang elektromagnetik yang dapat digunakan untuk sebagai penggerak arus listrik secara berkesinambungan.

Gaya Gerak Listrik Induksi atau GGL induksi adalah beda potensial pada ujung-ujung kumparan yang akan menghasilkan arus listrik induksi. Arus listrik induksi muncul selama ada perubahan fluks magnetik ($d\Phi$). Dengan kata lain, GGL induksi sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik dan banyak lilitan/kumparan (loop kumparan). Fluks magnetik dituliskan dengan persamaan berikut;

$$d\Phi = B A \cos \theta \quad (9.8)$$

Φ = fluks magnet (Wb)

B = medan magnet (T)

A = luas penampang (m^2)

θ = sudut antara medan magnet dan luas penampang ($^\circ$)

Faktor-faktor yang mempengaruhi GGL induksi yaitu:

1. Jumlah kumparan, apabila semakin banyak jumlah kumparannya maka ggl induksinya akan semakin besar
2. Kuat medan magnet pada kumparan. Apabila kuat medan magnetnya semakin besar pada kumparan, maka ggl induksinya akan semakin besar.
3. Bahan penyusun kumparan, jika kumparan terbuat dari bahan feromagnetik, maka ggl induksi semakin besar
4. Kecepatan gerak magnet, jika gerakan magnetnya semakin cepat maka ggl induksi yang timbul semakin besar.
5. Selanjutnya luas bidang kumparan. Jika luas kumparannya semakin besar maka ggl induksinya akan semakin besar.

Persamaan GGL induksi:

$$\varepsilon_{in} = -N \frac{d\phi}{dt}$$
$$\varepsilon_{in} = -N \frac{d(B.A.\cos\theta)}{dt} \quad (9.9)$$

ε_{in} = besar GGL induksi (volt)

N = jumlah kumparan

$d\phi$ = perubahan fluks magnetic (Wb)

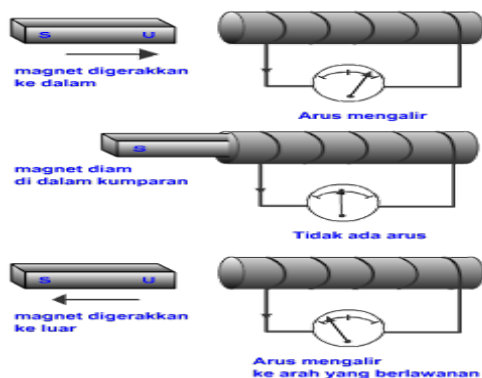
dt = perubahan waktu (detik)

Cara menghasilkan GGL Induksi adalah sebagai berikut

Ketika kutub utara magnet batang digerakkan masuk kedalam kumparan, jumlah garis gaya - gaya magnet yang ada dalam kumparan makin bertambah banyak sehingga menimbulkan GGL Induksi pada ujung-ujung kumparan. Arah arus induksi dapat ditentukan dengan memperhatikan arah medan magnet yang ditimbulkannya. Ketika garis gaya bertambah dalam kumparan, maka medan magnet yang berasal dari arus induksi bersifat mengurangi garis gaya itu. GGL induksi yang ditimbulkan akan menghasilkan arus listrik yang menggerakkan jarum Galvanometer. sehingga dapat disimpulkan ujung kumparan itu merupakan kutub utara dan arah arus induksinya bergerak ke kanan. (gambar 9.5)

Sebaliknya Ketika kutub utara dikeluarkan dari kumparan jumlah garis-garis gaya magnet dalam kumparan berkurang. Berkurangnya jumlah garis-garis gaya ini juga menimbulkan GGL pada ujung-ujung kumparan. Pada saat magnet keluar dari kumparan maka garis-garis gaya akan berkurang, mengakibatkan medan magnet hasil arus induksi bersifat menambah garis gaya itu. GGL induksi yang ditimbulkan menyebabkan arus listrik mengalir dan menggerakkan jarum Galvanometer. Sehingga dapat disimpulkan ujung kumparan itu merupakan kutub selatan sehingga arah arus Induksi bergerak ke kiri (gambar 9.5).

Ketika kutub utara magnet batang diam di dalam kumparan, maka jumlah garis-garis gaya magnet didalam kumparan tidak terjadi perubahan. Sehingga pada ujung-ujung kumparan tidak terjadi GGL induksi. Akibatnya tidak mengalir arus listrik dan jarum galvanometer tidak bergerak. (gambar 9.5). Jadi GGL Induksi dapat terjadi pada kedua ujung kumparan jika dalam kumparan terjadi perubahan jumlah garis-garis gaya magnet (Fluks magnet).

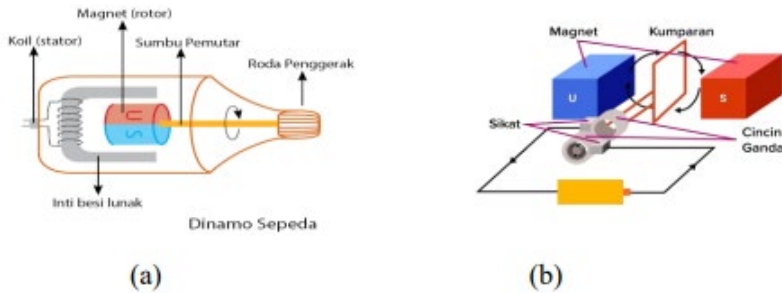


Gambar 9.5 Gerak keluar masuknya magnet kedalam kumparan yang menyebabkan penyimpangan Galvanometer

(Sumber: <https://arsyadriyadi.blogspot.com/2012/06/induksi-elektromagnetik.html>)

Jadi berdasarkan gambar diatas dapat disimpulkan berak keluar masuknya magnet dalam kumparan menyebabkan galvanometer menyimpang. Ketika kutub utara magnet mendekati kumparan, maka jarum galvanometer menyimpang ke kanan. Sebaliknya, jika kutub utara magnet menjauhi kumparan, maka jarum galvanometer menyimpang ke kiri. Dan ketika magnet makan jarum galvanometer tidak mengalami penyimpangan.

Adapun penerapan GGL induksi dalam kehidupan sehari-hari kita bisa temukan pada penggunaan dinamo dan generator AC sederhana.



Gambar 9. 6 (a) Dinamo sepeda, (b). Generator AC sederhana
<https://roboguru.ruangguru.com/question>

Daya Listrik

Dalam kehidupan sehari-hari energi listrik sangat berguna karena dapat diubah menjadi bentuk energi lain. Pada alat -alat listrik misalnya setrika, (energi listrik diubah menjadi energi panas), kipas angin (energi listrik diubah menjadi energi gerak), bohlam lampu (energi listrik diubah menjadi energi cahaya), dan sebagainya. Daya yang diubah oleh peralatan listrik tersebut merupakan bentuk energi yang diubah ketika muatan bergerak melintasi beda potensial, V.

Telah dijelaskan bahwa beda potensial antara dua buah titik adalah usaha atau energi yang dilakukan persatuan muata, apabila sebuah muatan bergerak dari titik yang satu ke titik yang lain.

$$V = \frac{W}{Q} \quad (9.10)$$

W = usaha (joule)

Q = muatan listrik (Coulomb)

V = beda potensial (J/C atau Volt)

Daya listrik merupakan kecepatan perubahan energi tiap satuan waktu, dapat dituliskan seperti persamaan berikut:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{QV}{t} \quad (9.11)$$

Muatan yang mengalir tiap satu satuan waktu merupakan arus listrik $I = Q/t$, sehingga diperoleh persamaan

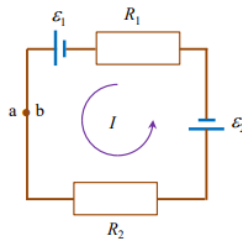
$$P = \frac{W}{t} = V \cdot I \quad (9.12)$$

Satuan Daya listrik dalam SI adalah Watt (1 W= 1 J/s)

Rangkaian Listrik Searah

Rangkaian Loop Tunggal

Jika titik a dan b pada Gambar 9.7 dihubungkan, maka akan didapatkan $V_{ab} = 0$ dan rangkaian menjadi tertutup. Rangkaian tertutup tersebut disebut dengan loop.



Gambar 9. 7 Rangkaian Loop Tunggal yang disusun oleh dua sumber tegangan dan dua hambatan.

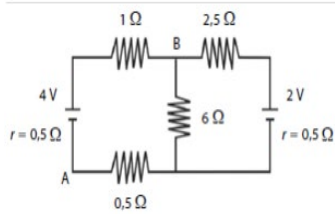
Karena $V_{ab} = 0$ maka khusus untuk loop, maka diperoleh persamaan:

$$\sum \varepsilon + \sum (I \cdot R) = 0 \quad 9.13$$

Rangkaian Multi Loop

Jumlah loop dalam rangkaian bisa terdiri dari beberapa loop. Prinsip yang digunakan sama dengan saat memecahkan persoalan satu loop. Contoh kita akan buat sebuah rangkaian yang terdiri dari dua loop. Persamaan yang digunakan sama halnya persamaan pada loop tunggal, hanya saja nanti akan muncul dua persamaan, karena ada dua arus yang harus dicari, yaitu arus yang mengalir pada masing-masing loop. Mari kita lihat contoh dibawah ini :

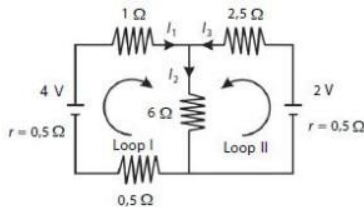
Tentukan kuat arus yang mengalir dalam hambatan di 1Ω , $2,5\Omega$ dan 6Ω serta tentukan juga besarnya beda potensial antara titik A dan B.



Gambar 9.8 Contoh soal penggunaan rangkaian multi loop
<https://mafia.mafiaol.com/2013/05/rangkaian-dengan-dua-loop-atau-lebih.html>

Penyelesaian:

Contoh soal diatas menggunakan konsep Hukum I Kirchhoff dan Hukum II Kirchhoff. Misalkan untuk loop I (pertama) kita arahkan sesuai dengan arah putaran jarum jam sedangkan untuk loop II (kedua) kita arahkan berlawanan dengan arah putaran jarum jam.



Gambar 9.9 Rangkaian yang menggunakan dua loop
<https://mafia.mafiaol.com/2013/05/rangkaian-dengan-dua-loop-atau-lebih.html>

- a. Mencari besarnya kuat Arus yang mengalir dalam hambatan di 1Ω, 2,5Ω dan 6Ω

Berdasarkan Hukum I Kirchhoff,

$$I_1 + I_3 = I_2 \text{ atau } I_1 = I_2 - I_3 \dots\dots\dots (1)$$

Berdasarkan hukum II Kirchhoff untuk loop I diperoleh

$$\Sigma E + \Sigma IR = 0$$

$$-4 + (0,5 + 1 + 0,5)I_1 + 6I_2 = 0$$

$$I_1 + 3I_2 = 2 \dots\dots\dots (1)$$

Berdasarkan hukum Kirchhoff II, untuk loop II diperoleh:

$$\Sigma E + \Sigma IR = 0$$

$$2 - (2,5 + 0,5)I_1 + 6I_2 = 0$$

$$3I_3 - 6I_2 = 2 \dots\dots\dots (3)$$

Substitusikan persamaan (1) ke (2), sehingga diperoleh

$$I_1 = 6/9 \text{ A}$$

$$I_2 = 4/9 \text{ A dan } I_3 = -2/9 \text{ A}$$

Jadi, kuat arus yang mengalir pada hambatan 1Ω adalah $2/9 \text{ A}$, yang mengalir pada hambatan $2,5\Omega$ adalah $4/9 \text{ A}$, dan yang mengalir pada hambatan 6Ω adalah $2/9 \text{ A}$ (tanda (-) menunjukkan bahwa arah arus berlawanan arah dengan arah pemisalan).

b. Mencari besarnya tegangan yang mengalir di AB (V_{AB}), yakni:

$$V_{AB} = \Sigma \varepsilon + \Sigma IR$$

$$V_{AB} = -4V + I_1(0,5 + 1)\Omega$$

$$V_{AB} = -4V + (6/9A)(1,5\Omega)$$

$$V_{AB} = -4V + 1V$$

$$V_{AB} = -3V$$

Kita juga bisa mencarinya dengan jalan lain (jalur tidak ada ε) yaitu:

$$V_{AB} = \Sigma \varepsilon + \Sigma IR$$

$$V_{AB} = I_1(0,5\Omega) + I_2(6\Omega)$$

$$V_{AB} = (6/9A)(0,5\Omega) + (4/9A)(6\Omega)$$

$$V_{AB} = 3/9V + 24/9V$$

$$V_{AB} = 3V$$

Jadi, tegangan yang mengalir di AB sebesar 3 Volt.

Hukum Kirchhoff

Banyak rangkaian kompleks, yang tidak dapat dianalisis dengan teknik seri-paralel yang dikembangkan dalam Resistor dalam Seri dan Paralel dan Gaya Gerak Listrik. Namun, ada dua aturan analisis rangkaian yang dapat digunakan untuk menganalisis rangkaian apa pun, sederhana atau kompleks. Aturan-aturan ini merupakan kasus khusus dari hukum kekekalan muatan dan kekekalan energi. Aturan-aturan tersebut dikenal sebagai Aturan Kirchhoff (Hukum Kirchhoff), sesuai dengan nama penemunya, Gustav Kirchhoff (1824-1887).

Untuk menganalisis suatu rangkaian listrik, baik arus maupun beda potensial listrik antara dua titik percabangan digunakanlah suatu hukum

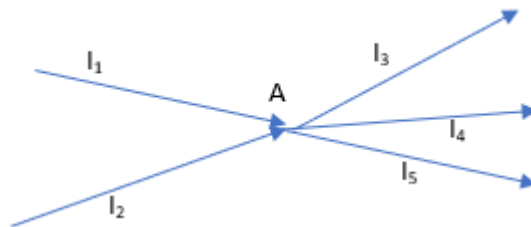
yang disebut dengan hukum Kirchhoff. Hukum tersebut terdiri atas dua bagian yaitu:

- **Hukum I Kirchhoff** - (aturan persimpangan) berbunyi jumlah semua arus yang masuk ke persimpangan harus sama dengan jumlah semua arus yang keluar dari persimpangan.

- **Hukum II Kirchhoff** - (aturan putaran) berbunyi jumlah aljabar perubahan potensial di sekitar jalur rangkaian tertutup (loop) harus nol.

Hukum Pertama Kirchhoff

Hukum I Kirchhoff merupakan hukum kekekalan muatan yang menyatakan bahwa jumlah muatan yang mengalir tidak berubah, artinya arus yang menuju titik persimpangan sama besarnya dengan arus yang meninggalkan titik persimpangan. Sebagai contoh diberikan persimpangan dititik A oleh dua arus yang masuk yaitu I_1 dan I_2 dan tiga arus yang keluar dari titik persimpangan I_3 , I_4 dan I_5 , seperti pada gambar berikut:



Gambar 9. 10 Titik persimpangan arus

Berdasarkan hukum I Kirchhoff bahwa arus yang menuju titik persimpangan sama besarnya dengan arus yang meninggalkan titik persimpangan, maka diperoleh persamaan:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5 \quad (9.13)$$

Hukum II Kirchhoff merupakan implementasi dari Hukum kekekalan energi pada rangkaian tertutup. Hukum II Kirchhoff mampu menganalisis rangkaian yang tidak dapat disederhanakan menggunakan kombinasi rangkaian listrik yang disusun secara seri dan parallel. Jadi ketika muatan yang mengalir dalam rangkaian sudah kembali ke titik awal, jumlah energinya harus sama dengan sebelum muatan tersebut bergerak. Energi dalam rangkaian listrik bersumber dari potensial listrik pada setiap titik persimpangan dan karena bersifat kekal, maka jumlah beda potensial dalam rangkaian tertutup sama dengan nol atau dapat dituliskan:

$$\sum \varepsilon + \sum(I.R) = 0 \quad (9.14)$$

Dalam menerapkan hukum II Kirchhoff harus mengikuti beberapa aturan:

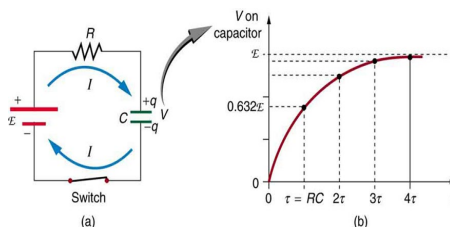
1. Memilih loop untuk masing-masing lintasan tertutup pada arah tertentu. Pada dasarnya pemilihan loop dapat dilakukan secara bebas tapi perlu diperhatikan juga supaya arah loop sebaiknya searah dengan arah arus
2. Pada satu titik persimpangan, arah lintasan Loop sama dengan arus artinya penurunan jumlah tegangan bertanda positif sedangkan jika berlawanan arah maka penurunan jumlah tegangan bertanda negatif.
3. Jika mengikuti arah loop, kutub sumber tegangan yang lebih dulu dijumpai adalah kutub positif maka ε bertanda positif. Sebaliknya bila kutub negatif yang lebih dulu dijumpai maka ε bertanda negatif.

Rangkaian RC

Rangkaian RC adalah rangkaian yang mengandung resistor R dan kapasitor C. Kapasitor adalah komponen listrik yang menyimpan muatan listrik. Gambar 9.9 berikut menunjukkan sebuah rangkaian RC sederhana yang menggunakan sumber tegangan DC (arus searah). Kapasitor pada awalnya tidak bermuatan. Segera setelah saklar ditutup, arus mengalir ke dan dari kapasitor yang awalnya tidak bermuatan. Ketika muatan meningkat pada pelat kapasitor, ada peningkatanoposisi terhadap aliran muatan oleh tolakan muatan sejenis pada setiap pelat.

Dalam hal tegangan, ini karena tegangan pada kapasitor diberikan oleh $V_c = Q / C$, di mana Q adalah jumlah muatan yang tersimpan pada setiap pelat dan C adalah kapasitansi. Tegangan ini berlawanan dengan baterai, tumbuh dari nol hingga ggl maksimum ketika terisi penuh. Dengan demikian, arus berkurang dari nilai awal $I_0 = \text{ggl}/R$ menjadi nol karena tegangan pada kapasitor mencapai nilai yang sama dengan ggl. Ketika tidak ada arus, maka tidak terjadi penurunan IR, sehingga tegangan pada kapasitor harus sama dengan ggl sumber tegangan. Hal ini juga dapat dijelaskan dengan aturan kedua Kirchhoff (aturan loop), yang dibahas dalam Aturan Kirchhoff, yang mengatakan bahwa jumlah aljabar perubahan potensial di sekitar loop tertutup harus nol.

Arus awal adalah $I_0 = \text{ggl} / R$, karena semua penurunan IR ada dalam hambatan. Oleh karena itu, semakin kecil resistansi, semakin cepat kapasitor yang diberikan akan terisi. Perhatikan bahwa resistansi internal sumber tegangan termasuk dalam R , seperti halnya resistansi kapasitor dan penghubung kabel.



Gambar 9. 11 (a) Rangkaian RC dengan kapasitor yang pada awalnya tidak terisi daya. Arus mengalir ke arah yang ditunjukkan (berlawanan dengan aliran elektron) segera setelah sakelar ditutup. Saling tolakan muatan yang sama dalam kapasitor secara progresif memperlambat aliran ketika kapasitor diisi, menghentikan arus ketika kapasitor terisi penuh dan $Q = C \cdot \text{ggl}$. (b) Grafik tegangan melintasi kapasitor terhadap waktu, dengan sakelar ditutup pada waktu $t = 0$.

(sumber: College physics, textbook Equity Edition, 2013)

Daftar Pustaka

- Anonim. (2013). *College physics, textbook Equity Edition, Volume 2 of 3: Chapters 13 – 24*.
Texas : Rice University
- Abdullah, M. (2017). *Fisika Dasar II*. Bandung : Institut Teknologi Bandung
- Giancoli, Douglas C. (2001). *Fisika jilid 2*. Jakarta : Erlangga
- Tim Dosen Jurusan Fisika. (2013). *Diklat Kuliah Fisika Dasar*. Makassar : UIN Alauddin Makassar
- Mulyadi. (2019). *Ensiklopedia Sains (Atmosfer-Cahaya-Energi-Listrik-Benda da Sifatnya)*. Semarang : Alprin
- <https://arsyadriyadi.blogspot.com/2012/06/induksi-elektromagnetik.html>
- (<https://mafia.mafiaol.com/2013/05/rangkaian-dengan-dua-loop-atau-lebih.html>)
- https://roboguru.ruangguru.com/question/gambarkan-struktur-suatu-generator-ac-gambarkan-secara-sketsa-besarnya-tegangan-atau-ggl_QU-V73AGZLA)

Profil Penulis



Nurul Fuadi, S.Si., M. Si.

Penulis lahir di Sengkang kab. Wajo pada tanggal 30 Oktober 1983. Anak ke 1 dari 2 bersaudara merupakan Lulusan Sarjana Fisika (S1) Fakultas MIPA di Universitas Hasanuddin Makassar pada tahun 2007 dan juga telah menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada jurusan Biofisika Fakultas MIPA, Institut Pertanian Bogor pada tahun 2010. Saat ini Penulis aktif mengajar di jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar. Mata kuliah yang diajarkan Fisika Dasar, Biofisika, Termodinamika, Fisika Statistik, Biomaterial, BioKimia dan Anatomi dan Fisiologi Tubuh Manusia. Penulis juga aktif menerbitkan beberapa artikel baik jurnal Nasional bersinta maupun prosiding Nasional dan Internasional. Penulis juga sebagai reviewer pada jurnal JFT Jurusan Fisika UINAM dan dan JPF Jurusan Pendidikan Fisika UINAM. Serta aktif dalam organisasi bidang kepakaran maupun non kepakaran.

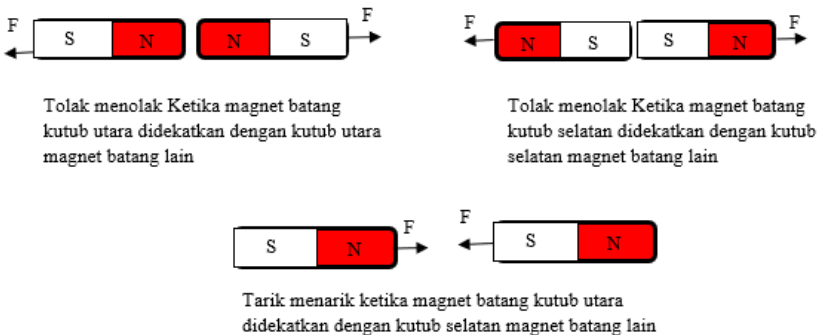
Email: nurul.fuadi@uin-alauddin.ac.id

MEDAN MAGNETIK

Ety Kurniati
Universitas palangka Raya

Definisi Medan Magnetik

Fenomena magnet pertama kali diamati lebih kurang 2500 tahun yang lalu dalam fragmen besi magnet yang ditemukan di dekat kota kuno Magnesia (Manisa, di Turki barat). Pada saat itu ditemukan bahwa ketika sebuah batang besi didekatkan dengan sebuah magnet alam, teroda juga menjadi termagnetisasi. Ketika besi tersebut digantung menggunakan tali dari pusatnya, maka besi tersebut cenderung lurus ke atas ke arah utara-selatan, seperti jarum kompas. Magnet dapat dimanfaatkan sebagai navigasi. Interaksi magnet batang dan jarum kompas dijelaskan dalam bentuk kutub magnet. Ujung magnet batang yang mengarah ke kutub utara geografis bumi disebut kutub utara, atau kutub N, dan ujung lainnya disebut kutub selatan, atau kutub S. Dua kutub yang berlawanan menarik satu sama lain, dan dua kutub yang sejenis saling tolak seperti pada Gambar 10.1.

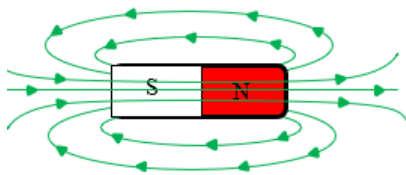


Gambar 10.1. Gaya Tarik menarik dan tolak menolak sebuah batang magnet yang didekatkan dengan magnet batang lain

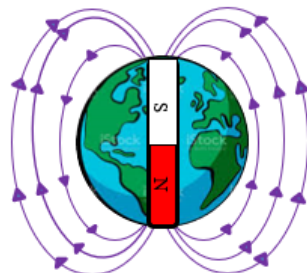
Konsep medan magnet dapat dipahami dengan menggunakan konsep medan listrik. Interaksi listrik dapat diinterpretasikan dengan: (1)

Distribusi muatan listrik yang diam menciptakan medan listrik pada semua titik di ruang sekitarnya. (2) Medan listrik memberikan gaya pada muatan lain q yang ada di medan tersebut. Dari interaksi listrik tersebut, medan magnetic dapat diinterpretasikan dengan; (1) Magnet permanen muatan yang bergerak atau arus dapat menciptakan medan magnet di semua titik di ruang sekitarnya. (2) Medan magnet memberikan gaya pada muatan atau arus yang merepresentasikan medan tersebut. Medan magnet merupakan besaran vektor yang diasosiasikan dengan setiap titik dalam ruang. Medan magnet dapat diciptakan oleh muatan atau arus yang bergerak. Dalam hal ini, medan magnet juga tercipta oleh adanya gaya magnet pada suatu muatan atau arus bergerak.

Garis-garis Medan Magnetik



Gambar 10.2. Garis-garis medan magnet pada batang magnet



Gambar 10.3. Garis-garis medan magnet pada bumi

Garis medan magnet adalah alat visual yang digunakan untuk merepresentasikan medan magnet. Garis-garis ini menunjukkan adanya medan magnet di luar magnet. Kekuatan garis magnet sama di seluruh bagian dan sebanding dengan seberapa dekat garis tersebut. Kita dapat menemukan kekuatan medan magnet dari kerapatan garis-garis magnet. Adapun sifat penting dari garis gaya magnet meliputi:

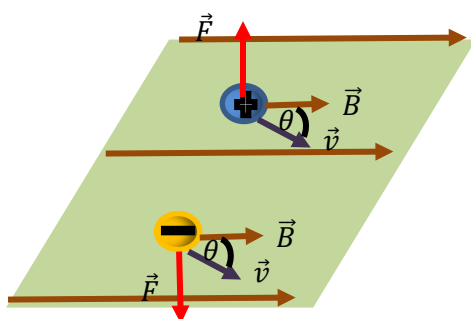
- a) Garis-garis medan magnet berasal dari kutub utara dan berakhir di kutub selatan. Namun, garis medan magnet di dalam magnet dimulai dari kutub selatan dan berakhir di kutub utara. Oleh karena itu, garis medan magnet menyelesaikan satu lingkaran.
- b) Saat kita meningkatkan jarak antara kutub, kerapatan garis magnet berkurang. Kekuatan medan magnet tergantung pada kerapatan garis medan magnet. Kita dapat menemukan fluks magnet, dan pada gilirannya, menemukan kekuatan medan magnet.

Garis-garis medan magnet merepresentasikan medan magnet. Hal ini sama halnya dengan medan listrik. Garis-garis medan magnet pada

batang magnet secara sederhana dapat digambarkan seperti pada Gambar 10.2. Pada Gambar 10.2 menjelaskan bahwa garis medan magnet di luar titik magnet menjauhi kutub utara dan menuju kutub selatan. Kutub utara magnet menunjuk ke kutub geografis utara bumi, sedangkan kutub selatan magnet menunjuk ke kutub geografis selatan. Kutub utara sebuah magnet tertarik ke arah kutub utara geografis bumi, maka kutub magnet selatan bumi terletak di dekat kutub utara geografis dan kutub magnet utara bumi terletak di dekat kutub selatan geografis. Konfigurasi garis-garis medan magnet bumi digambarkan seperti pada Gambar 10.3.

Medan Magnetik oleh Partikel bermuatan

Medan magnet merupakan medan gaya yang berada di sekitar benda yang memiliki sifat magnetik atau benda konduktor yang berarus. Medan magnet adalah medan vektor yang mana setiap titik dalam ruang vektor dapat berubah terhadap waktu. Arah dari medan magnet ini selaras dengan arah jarum kompas yang diletakkan di dalam medan tersebut. Hal ini dijelaskan oleh eksperimen yang dilakukan oleh Oersted pada sub Bab 10.4. Medan magnet diciptakan oleh arus listrik yang mengalir melalui kawat atau konduktor lainnya. Arus listrik yang mengalir melalui kawat, akan menghasilkan medan magnet yang berputar di sekitar kawat. Medan magnet ini memiliki arah yang sejajar dengan arah arus listrik yang mengalir melalui kawat, dan arah putarannya dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan.



Gambar 10.4. Pengaruh tanda muatan pada gaya magnet yang

Medan magnet merupakan suatu medan yang dihasilkan oleh partikel bermuatan yang bergerak dengan kecepatan tertentu yang menyebabkan timbulnya gaya pada muatan listrik lainnya. Manifestasi paling mendasar dari medan magnet adalah gaya yang diberikan pada partikel bermuatan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada

Gambar 10.4 yang menjelaskan pengaruh tanda muatan pada gaya magnet yang diberikan. Karakteristik dari gaya tersebut yakni 1) besarnya sebanding dengan besarnya muatan pada partikel, 2) besarnya

sebanding dengan medan magnet, dan 3) besarnya sebanding dengan kecepatan partikel bermuatan. Selain itu, gaya magnet selalu tegak lurus terhadap medan magnet. Secara matematis besar gaya magnet dapat ditulis sebagai berikut.

$$F = q v B \sin \theta$$

Dengan F merupakan gaya magnet, v merupakan kecepatan, B merupakan medan magnet dan θ merupakan sudut antara medan magnet dengan kecepatan partikel.

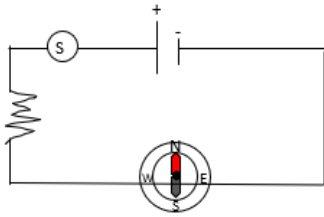
Percobaan Oersted



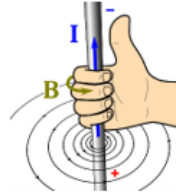
Hans Christian
Oersted (1777-1851)

Elektromagnet merupakan jenis magnet yang menghasilkan efek magnetik yang dihasilkan oleh arus listrik. Sebagian besar magnet dalam kehidupan kita adalah elektomagnet. Fenomena elektromagnetik dikemukakan oleh Hans Christian Oersted pada tahun 1819 percobaan sederhana. Oersted merupakan ilmuwan asal Denmark yang menemukan hubungan listrik dengan magnet dalam eksperimen yang disebut sebagai fenomena elektromagnetisme. Percobaan yang dilakukan Oersted yakni dengan mengamati jarum Kompas yang ditempatkan di bawah kawat yang dialiri arus listrik. Ketika arus mengalir melalui

rangkaian, elektron yang mengalir melalui kawat menghasilkan medan magnet yang mengelilinginya. Bagian utara jarum dibelokkan dengan memosisikan kompas magnetik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.5. Penjelasan lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 10.7 yang mana ini karena ada medan magnet yang dihasilkan oleh kawat pembawa arus. Arah medan magnet dapat ditunjukkan dengan aturan tangan kanan seperti pada Gambar 10.6. Aturan tangan kanan dapat digunakan untuk menentukan arah medan magnet pada posisi tertentu dan arah mata panah pada garis medan magnet yang merupakan arah jarum kompas. jari-jari melingkari kawat searah dengan medan magnet jika tangan kanan melingkari kawat dengan ibu jari menunjuk ke arah arus.



Gambar 10.5. Rangkaian listrik dengan Kompas



Sumber: Serway, 2010

Gambar 10.6. Kaidah tangan kanan



Ketika kawat tidak membawa arus, maka jarum Kompas menunjuk

Ketika kawat membawa arus, maka jarum Kompas menyimpang. Arah bergantung arus pada kawat.

Gambar 10.7. Perilaku kompas jika diletakkan di atas kawat

Interaksi listrik dan magnet memiliki hubungan yang kuat. Misalkan magnet bumi dihasilkan dari arus listrik yang bersirkulasi di inti cairnya bumi. Jarum kompas menunjuk ke utara karena bumi adalah elektromagnet. Inti luar bumi terbuat dari logam cair konduktif, yang membawa arus listrik besar dan mengalir secara perlahan. Arus di inti menghasilkan medan magnet bumi yang berubah sepanjang waktu. Medan bumi secara berkala berbalik arah, sehingga bekas kutub magnet utara menjadi kutub magnet selatan, begitu pula sebaliknya. Manusia merupakan salah satu makhluk yang menggunakan medan magnet bumi untuk navigasi. Selain itu, banyak organisme mulai dari beberapa bakteri hingga merpati dan bahkan mungkin paus, dapat merasakan medan magnet dan menggunakannya untuk navigasi atau orientasi.

Hukum Biot – Savart

Sumber :
https://en.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste_Biot

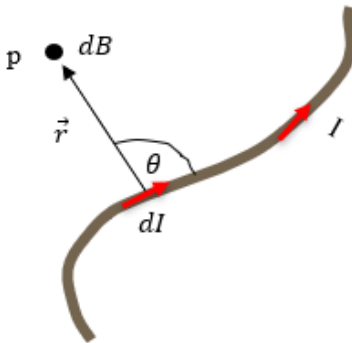


Jean-Baptiste Biot (1774–1862)



Félix Savart (1791–1841)

Sumber :
<https://www.upsbatterycenter.co.m/blog/felix-savart-physicist-studied-acoustics-vibration->



Gambar 10.8. Medan magnet pada kawat arus yang tidak beraturan

Setelah penemuan Oersted pada tahun 1819 tentang jarum kompas yang dibelokkan oleh konduktor yang membawa arus, pada tahun 1920, Jean-Baptiste Biot dan Félix Savart melakukan eksperimen tentang gaya yang diberikan oleh arus listrik pada benda yang terletak didekatnya magnet. Hasil percobaan Biot dan Sarvart menyatakan bahwa medan magnet pada suatu titik berbanding lurus dengan arus dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara titik dan konduktor

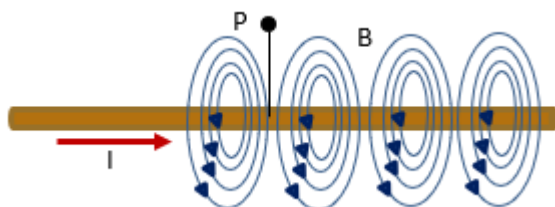
pembawa arus. Hasil percobaanya diekspresikan dalam

bentuk persamaan matematis yang memberikan medan magnet di beberapa titik dalam ruang yang berkaitannya dengan arus yang menghasilkan medan tersebut. Persamaan tersebut didasarkan pada pengamatan eksperimen yang mada medan magnet dB pada titik P yang dihubungkan dengan elemen panjang dari kawat yang membawa arus tetap I seperti pada Gambar 10.8. Besarnya medan magnet yang disebabkan oleh penghantar dengan panjang yang membawa arus I , diberikan oleh;

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\Delta l \sin \theta}{r^2}$$

Yang mana dB merepresentasikan medan magnet (T) kecil yang dihasilkan oleh arus yang sangat kecil, μ_0 merupakan permeabilitas ruang sebesar $4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$, I merupakan arus (A) dan r merupakan jarak antara elemen arus dan titik di ruang tempat medan magnet yang dihitung.

Hukum Biot – Savart

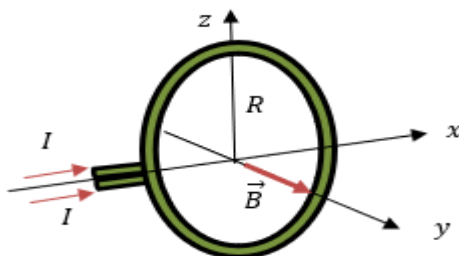


Gambar 10.9. Medan Magnet pada Kawat Lurus Berarus

Medan magnet dapat dihasilkan oleh muatan yang bergerak atau benda yang memiliki arus. Hal ini dapat dijelaskan dengan beberapa konfigurasi sederhana seperti salah satunya kawat lurus yang berarus listrik. Konfigurasi tersebut merupakan metode sederhana untuk menghitung besar medan magnet B yang dihasilkan oleh arus dalam konduktor atau kawat lurus yang berarus stabil I . Secara sederhana, medan magnet yang dihasilkan oleh kawat yang berarus dapat dilihat pada Gambar 9. Adapun besar medan magnet yang dihasilkan oleh kawat lurus berarus listrik yang memiliki jarak r dari titik P secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Medan Magnetik Oleh Kawat Melingkar Berarus Listrik

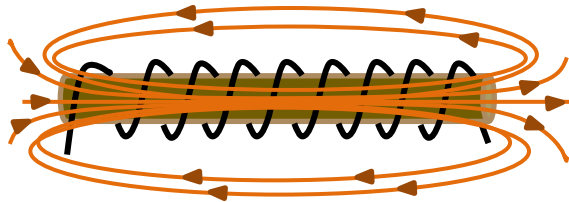


Gambar 10.10. Medan Magnet pada Kawat Melingkar Berarus

Medan magnet dapat dihasilkan oleh muatan yang bergerak yang mana dapat dijelaskan dengan konfigurasi lain selain kawat lurus yang berarus listrik. Medan magnet juga dapat dijelaskan dengan konfigurasi kawat melingkar yang berarus listrik. Konfigurasi ini merupakan salah satu metode sederhana yang digunakan untuk menghitung medan magnet oleh kawat melingkar berarus listrik seperti pada Gambar 10.10 Secara matematis besar medan magnet yang dihasilkan di pusat kawat melingkar berarus listrik sebagai berikut.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}$$

Medan Magnetik Oleh Solenoida

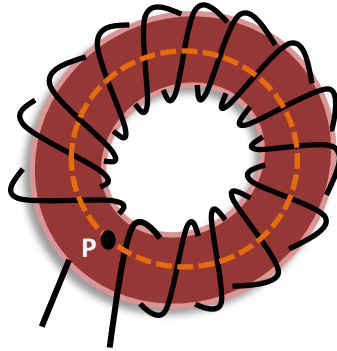


Gambar. 10.11. Medan Magnet pada Solenoida

Solenoida adalah jenis elektromagnet yang dimaksudkan untuk menghasilkan medan magnet yang terkontrol. Solenoida merupakan lilitan kawat yang berbentuk heliks dan biasanya melilit permukaan bentuk silinder seperti pada Gambar 10.11. Pada ruang yang dikelilingi lilitan kawat pada solenoida ketika membawa arus dapat menghasilkan medan magnetik yang sama pada masing-masing lilitan. Medan magnet yang dihasilkan adalah jumlah vektor dari medan yang dihasilkan dari semua putaran. Garis-garis medan pada ruang hampir sejajar satu sama lain dan terdistribusi merata. Hal ini menunjukkan bahwa medan di ruang tersebut kuat dan besarnya hampir sama. Medan magnet lebih banyak ditemukan di tengah dibandingkan diujung solenoida. Besar medan magnet B di pusat bergantung pada jumlah lilitan per satuan panjang solenoida (n). Jika terdapat N lilitan yang terdistribusi secara merata pada panjang total l , maka Besar medan magnet B di pusat solenoida diberikan oleh

$$\begin{aligned} \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} &= \mu_0 N I \\ B l &= \mu_0 N I \\ B &= \mu_0 \frac{N}{l} I \\ B &= \mu_0 n I \end{aligned}$$

10.9 Medan Magnetik Oleh Toroida



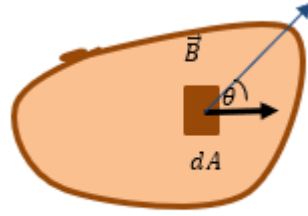
Gambar 10.12. Medan Magnet pada

Toroida merupakan cincin melingkar berongga yang dililit oleh kawat pembawa arus seperti pada Gambar 10.12. Toroida dapat digunakan untuk membuat medan magnet yang hampir sama di beberapa area tertutup. Pada Gambar 10.12 misalkan medan magnet B ada di titik P yang berada di dalam toroid. Pada gambar di atas, loop dianggap sebagai loop amperian yang membentuk lingkaran melalui titik P sehingga menghasilkan lingkaran konsentris di dalam toroida. Besar medan di semua titik dalam lingkaran adalah sama dan medannya tangensial dikarenakan medan simetris. Jika toroida di atas dikelilingi oleh banyak kawat N yang berjarak dekat, maka medan magnet yang ditempati oleh torus (kawat konduktor yang mengelilingi cincin) dan berjarak r dari pusat lingkaran adalah

$$\oint \vec{B} \, d\vec{s} = \mu_0 N I$$
$$B \oint ds = \mu_0 N I$$
$$B (2\pi r) = \mu_0 N I$$
$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}$$

Fluks Magnetik dan Hukum Gauss

Fluks magnetik didefinisikan sama dengan fluks yang berkaitan dengan medan listrik. Sebuah elemen luas dA pada permukaan yang berbentuk sembarang seperti pada Gambar 10.13. Jika medan magnet pada elemen tersebut adalah \vec{B} , maka magnetik fluks pada yang melalui elemen tersebut adalah $\vec{B} \cdot \vec{dA}$ yang mana \vec{dA} merupakan vektor yang tegak lurus dengan permukaan dan besarnya sama dengan dA . Fluks total Φ_{total} yang melalui permukaan tersebut adalah :



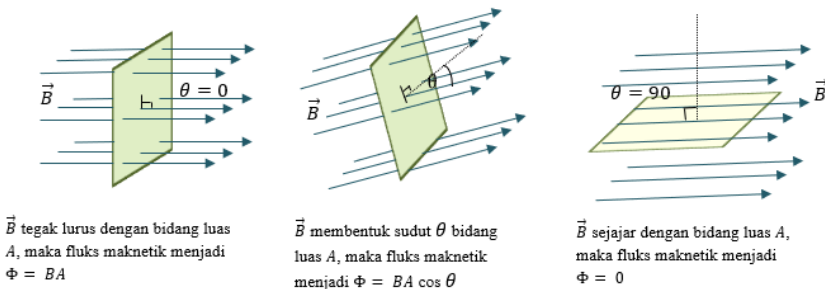
Gambar 10.13. Fluks magnetik yang melalui luas

$$\Phi_{total} = \int \vec{B} \cdot \vec{dA}$$

Untuk kasus khusus pada suatu bidang luas A yang mana medan magnetiknya membentuk sudut θ dengan \vec{dA} , maka fluks magnet yang melewati bidang tersebut adalah

$$\Phi_{total} = BA \cos \theta$$

Jika B tegak lurus dengan bidang luas A , maka $\cos \theta = 1$. Hal ini menyebabkan fluks magnet yang melewati permukaan menjadi $\Phi = BA$. Untuk lebih jelasnya beberapa kasus pada bidang datar dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 10.14. Fluks magnetik yang melalui bidang datar yang bervariasi

Pada Bab 5 terkait medan listrik bahwa fluks listrik yang melalui permukaan tertutup yang mengelilingi muatan bersih sebanding dengan

muatan tersebut (hukum Gauss). Dengan kata lain, jumlah garis medan listrik yang meninggalkan permukaan hanya bergantung pada muatan bersih di dalamnya. Hal ini berbeda dengan medan magnet yang kontinu dan membentuk loop tertutup. Untuk setiap permukaan tertutup, jumlah garis yang memasuki permukaan sama dengan jumlah yang meninggalkan permukaan. Hal ini berarti bahwa fluks magnet bersihnya adalah nol. Hukum Gauss pada magnet mengemukakan bahwa fluks magnet yang melalui permukaan tertutup besarnya selalu nol. Secara matematis dapat ditulis seperti berikut;

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Hukum Ampere

Hukum Ampere merupakan hukum yang dikemukakan oleh Fisikawan Prancis Andre-Marie Ampere. Hukum Ampere memberikan rumus alternatif yang menjelaskan hubungan antara medan magnet dan sumbernya. Hukum Ampere merupakan analogi bagi hukum Gauss. Untuk dapat memahami hukum Ampere, tinjau suatu kawat lurus berarus yang panjangnya tak terhingga.



Andre-Marie Ampère
(1775–1836)

Sumber :
<https://pixels.com/featured/andre-marie-ampere-french-physicist-sheila-terry.html>

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Kemudian masing-masing sisi dikalikan $2\pi r$

$$B (2\pi r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (2\pi r)$$

$$B (2\pi r) = \mu_0 I$$

$$B \Delta s = \mu_0 I$$

Dengan B merupakan besaran medan magnet pada jarak r dari konduktor lurus panjang yang membawa arus I . Hukum Ampere menyatakan bahwa untuk setiap jalur loop tertutup, jumlah elemen panjang dikali medan magnet dalam arah elemen panjang sama dengan permeabilitas dikalikan arus listrik yang dilingkupi dalam loop.

$$\sum B \Delta s = \mu_0 I$$

Daftar Pustaka

Serway, R. & Jewwet, J. (2010). *Physics for Scientist and Engineers with Modern Physics (8th edition)*. Canada: Nelson Education.

Young, H. (2011). *College Physics (9th edition)*. San Fransisco: Addison- Wesley.

Profil Penulis



Ety Kurniati, S.Pd., M.Sc.

Penulis bernama lengkap Ety Kurniati, S.Pd., M.Sc. lahir di kota Bima provinsi Nusa Tenggara Barat pada tanggal 2 Mei 1996. Pendidikan dasar sampai menengah atas diselesaikannya di Kota Bima. Penulis menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di prodi pendidikan fisika jurusan fisika FMIPA Universitas Negeri Malang (UM) pada tahun 2017 dan strata dua (S2) di jurusan fisika Universitas Gadjah Mada (UGM) dengan bidang minat fisika teori khususnya fisika partikel pada tahun 2020.

Selama kuliah S1, penulis aktif menjadi asisten dosen praktikum Fisika Dasar 1, Fisika Dasar 2, Fisika Dasar 3 dan Fisika Modern. Penulis juga aktif menjadi pengajar Bimbingan Baca Qur'an (BBQ) pada mata kuliah Agama Islam. Sejak tahun 2022, penulis bekerja sebagai dosen fisika di prodi fisika FMIPA Univerisitas Palangka Raya. Penulis juga aktif sebagai peneliti di bidang fisika. Buku chapter ini merupakan karya pertama penulis. Semoga bermanfaat.

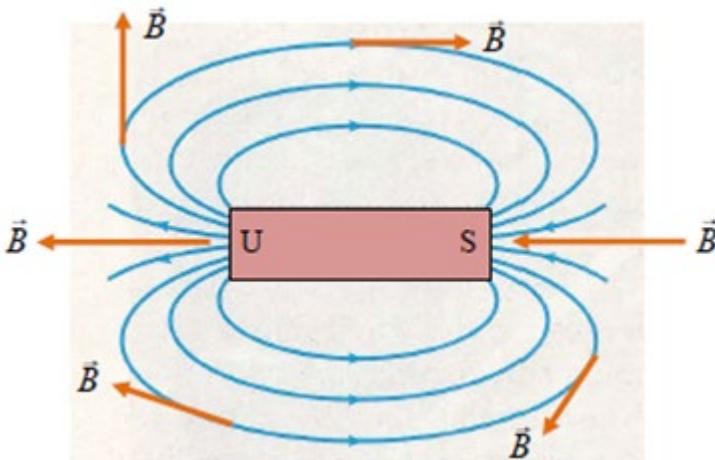
Email Penulis: etykurniati@upr.mipa.ac.id

GAYA MAGNETIK

Kurniati Abidin

Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar

Gaya magnet merupakan konsekuensi dari gaya elektromagnetik yang disebabkan oleh muatan yang bergerak. Dua benda bermuatan dengan arah gerak yang sama memiliki gaya tarik magnet diantara keduanya. Sebaliknya, benda bermuatan yang bergerak berlawanan arah memiliki gaya tolak diantara mereka. Dalam bab ini membahas bagaimana muatan bergerak mengelilingi dirinya dengan medan magnet, sehingga dalam konteks ini gaya magnet dapat juga dikatakan sebagai gaya yang timbul akibat interaksi medan magnet.



Gambar 11.1. Lukisan medan magnet (Mikrajuddin A, 2017)

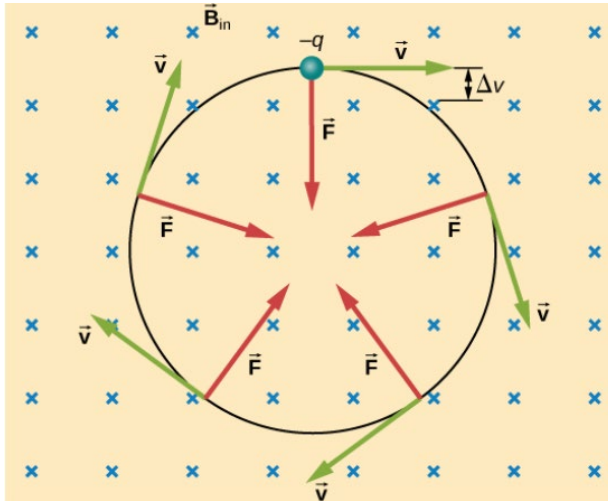
Gaya magnet divisualisasikan dengan garis-garis medan magnet atau *fluks magnetik* (Gambar 11.1), dengan aturan sebagai berikut:

1. Kuat medan magnet sebanding dengan kerapatan garis, atau jumlah garis per satuan luas yang tegak lurus dengan garis.
2. Garis medan magnet tidak pernah perpotongan.

3. Garis medan magnet kontinu, membentuk lingkaran tertutup tanpa awal dan akhir. Bergerak dari kutub utara ke kutub selatan.

Gaya Magnetik pada Muatan yang Bergerak

Partikel bermuatan akan mengalami gaya ketika bergerak melalui medan magnet. Kasus paling sederhana yaitu ketika partikel bermuatan bergerak tegak lurus ke medan B (Gambar 11.2). Jika medan berada dalam ruang hampa, medan magnet merupakan faktor dominan yang menentukan gerak. Karena gaya magnet tegak lurus terhadap arah gerak, partikel bermuatan mengikuti jalur melengkung dalam medan magnet. Partikel terus mengikuti jalur lengkung hingga membentuk lingkaran penuh.



Gambar 11.2. Partikel bermuatan negatif bergerak di bidang kertas di daerah medan magnet tegak lurus dengan kertas (diwaliki oleh \times). Gaya magnet tegak lurus terhadap kecepatan, sehingga kecepatan berubah arah. Hasilnya adalah gerak melingkar beraturan. (Karena muatan negatif, maka arah gaya berlawanan dengan kaidah tangan kanan) (Samuel dkk, 2016)

Dalam kasus ini, gaya magnetik akan berperan sebagai gaya sentripetal $F_c = \frac{mv^2}{r}$ yang menyebabkan partikel bergerak melingkar. Kecepatan tegak lurus terhadap medan magnet F menyebabkan besar gaya magnet berkurang sebesar $F = qvB$. Karena gaya magnet F sebanding dengan gaya sentripetal F_c , maka

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

Berdasarkan persamaan tersebut, diperoleh jari-jari lingkaran yang terbentuk r dan kecepatan sudut partikel v , sebagai berikut

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{v}{\frac{mv}{qB}} = \frac{|q|B}{m} \quad 11.2$$

Waktu yang digunakan partikel bermuatan untuk mengelilingi lintasan didefinisikan sebagai period, yaitu sama dengan jarak yang ditempuh (keliling) dibagi dengan kecepatan, sebesar

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Jika kecepatan tidak tegak lurus dengan medan magnet, maka komponen kecepatan dapat dipisah menjadi kecepatan yang tegak lurus dan yang sejajar terhadap medan magnet.

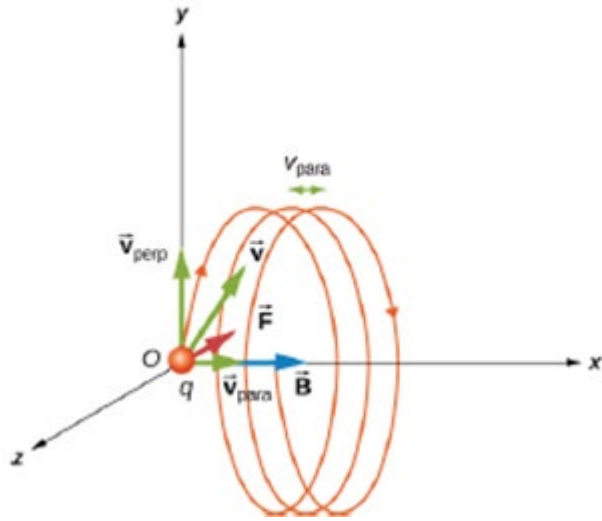
$$v_{tegak\ lurus} = v \sin \theta$$

$$v_{sejajar} = v \cos \theta$$

Dengan θ adalah sudut antara v dan B . Komponen kecepatan yang sejajar dengan medan magnet menghasilkan gerak konstan yang searah dengan medan magnet. Gerak sejajar menentukan titik p yang merupakan jarak antara belokan yang berdekatan. Jarak ini sama dengan komponen kecepatan sejajar dikali dengan periode

$$p = v_{sejajar}T$$

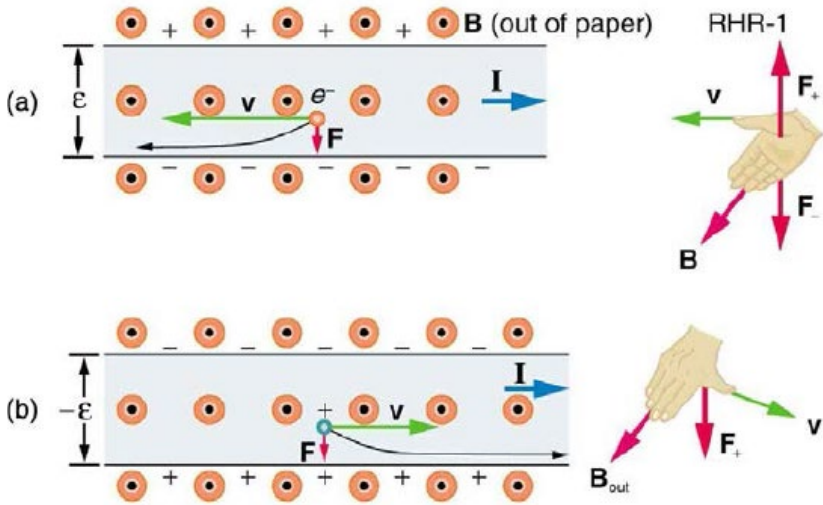
Yang menghasilkan gerak spiral, seperti yang ditunjukkan gambar 11.3



Gambar 11.3. Partikel bermuatan bergerak dengan kecepatan tidak searah dengan medan magnet. Komponen kecepatan yang tegak lurus terhadap medan magnet menghasilkan gerak melingkar, sedangkan komponen kecepatan yang sejajar dengan medan menggerakkan partikel sejajar garis lurus. Sehingga menghasilkan gerakan spiral. (Samuel dkk, 2016)

Efek Hall

Selain muatan yang bergerak bebas, efek medan magnet juga mempengaruhi muatan yang bergerak dalam konduktor. Salah satunya adalah efek Hall. Gambar 11.4 menunjukkan peristiwa yang terjadi pada muatan yang bergerak melalui konduktor dalam medan magnet. Medan magnet tegak lurus terhadap kecepatan elektron dan lebar konduktor. Pada gambar bagian a), elektron membawa arus dan bergerak ke kiri. Bagian b), muatan positif membawa arus dan bergerak ke kanan. Elektron yang bergerak ditarik oleh gaya magnet ke satu sisi konduktor, meninggalkan muatan positif di sisi lain konduktor. Pemisahan muatan menghasilkan tegangan ϵ melintasi konduktor, yang dikenal sebagai ggl Hall.



Gambar 11.4. Efek Hall. a) elektron bergerak ke kiri plat konduktor (arus konvensional bergerak ke kanan), serta medan magnet keluar bidang gambar (diilustrasikan oleh titik lingkaran). Hal tersebut memberikan gaya pada muatan yang bergerak, menyebabkan timbulnya tegangan ε yang melintasi konduktor. b) muatan positif bergerak ke kanan (arus konvensional juga ke kanan), menghasilkan ggl Hall dengan tanda berlawanan, $-\varepsilon$. Jadi, jika arah medan dan arus diketahui, tanda pembawa muatan dapat diketahui dari prinsip efek Hall. (Paul, P. U. dkk, 2013)

Kesetimbangan gaya pada muatan bergerak dalam situasi dimana B , v dan l saling tegak lurus, seperti gambar (11.5). Meskipun gaya magnet, $F = qvB$ menggerakkan muatan negatif ke satu sisi, mereka tidak dapat menumpuk tanpa batas. Hal ini disebabkan karena medan listrik $F_e = qE$ memberikan gaya dengan nilai yang sama secara berlawanan.

$$qE = qvB$$

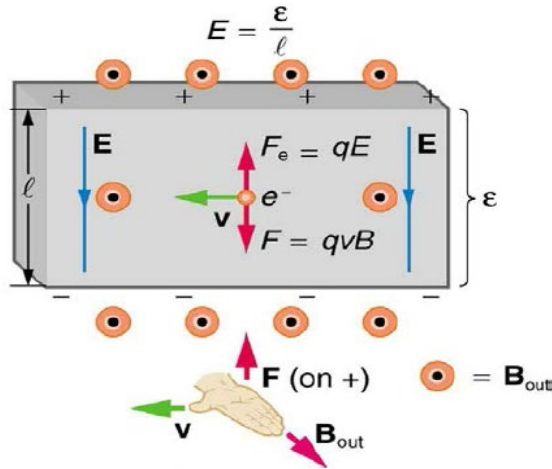
$$E = vB$$

Untuk medan listrik yang seragam, hubungan antara medan listrik dan tegangan adalah $E = \varepsilon/l$, dimana l adalah lebar konduktor 11.8

$$\frac{\varepsilon}{l} = vB \quad 11.9$$

$$\varepsilon = Blv$$

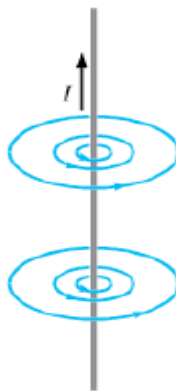
B , l dan v saling tegak lurus, dan ε adalah tegangan efek Hall yang melintasi konduktor dengan lebar l dengan kecepatan muatan v .



Gambar 11.5. ggl ε dihasilkan gaya listrik yang menyeimbangkan gaya magnet pada muatan yang bergerak. Gaya magnet menghasilkan pemisahan muatan yang menumpuk hingga diimbangi oleh gaya listrik. (Paul, P. U. dkk, 2013)

Gaya Magnetik pada Kawat Berarus Listrik

Medan magnet yang mengelilingi arus listrik pada kawat lurus panjang sedemikian rupa sehingga garis-garis medannya melingkar dengan kawat berada di tengah (Gambar 11.6). Medan magnet B akibat arus dalam kawat lurus panjang berbanding lurus dengan arus I dalam kawat dan berbanding terbalik dengan jarak r dari kawat.



Gambar 11.6. Garis medan magnet di sekitar kawat lurus panjang yang membawa arus listrik I . (Douglas, C. G. 2005)

$$B \propto \frac{I}{r} \quad 11.12$$

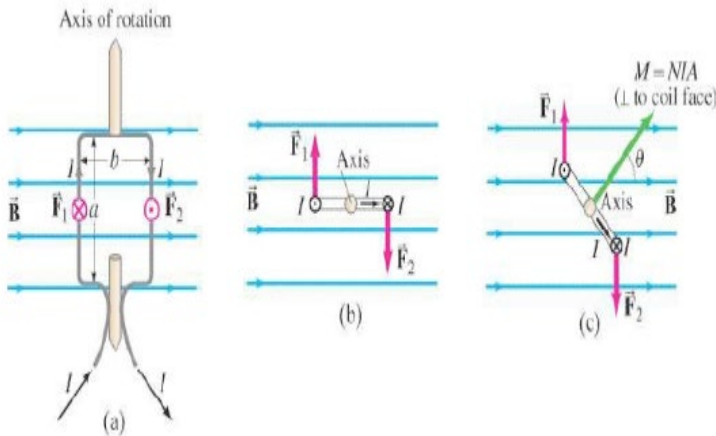
Persamaan tersebut berlaku selama r (jarak) tegak lurus terhadap kawat, jauh lebih kecil daripada jarak ke ujung kawat. Konstanta proporsionalnya ditulis $\mu_0/2\pi$, sehingga,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Konstanta μ_0 disebut permeabilitas ruang hampa, dengan nilai $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}/\text{A}$.

Gaya dan Torsi Magnetik pada Loop Berarus Listrik

Ketika arus listrik mengalir ke dalam lingkaran tertutup kawat yang ditempatkan di medan magnet luar, maka gaya magnet pada arus dapat menghasilkan torsi. Hal tersebut merupakan prinsip penting dibalik sejumlah divais seperti voltmeter, ammeter, dan motor.



Gambar 11.7. Garis medan magnet di sekitar kawat lurus panjang yang membawa arus listrik I . (Douglas, C. G. 2005)

Gambar 11.7a) mengilustrasikan arus yang mengalir melalui loop yang sejajar dengan medan magnet B berbentuk persegi panjang. Pada arah horizontal tidak ada gaya magnet B yang terjadi, karena pada arah horizontal kawat karena sejajar dengan medan sehingga $\sin \theta = 0$. Tetapi terdapat gaya magnet pada kawat vertikal karena kawat ini letaknya tegak lurus dalam rangkaian, yang ditunjukkan pada gambar 11.7b). Arah F_1 berlawanan arah dengan F_2 dengan besar yang sama. Gaya-gaya ini menimbulkan torsi yang cenderung memutar kumparan pada sumbu vertikal.

Untuk arus yang tegak lurus medan magnet memiliki gaya F sebesar $F = IaB$, dimana a adalah panjang lengan vertikal kawat. Lengan tuas untuk setiap gaya adalah $b/2$, dimana b lebar kumparan dan sumbu berada pada titik tengah. Torsi yang dihasilkan oleh F_1 dan F_2 bergerak pada arah yang sama, sehingga total torsi adalah jumlah dari 2 torsi:

$$\tau = IaB \frac{b}{2} + IaB \frac{b}{2} = IaBb = IAB$$

Dimana $A = ab$ luas kumparan. Jika kumparan terdiri dari N loop, maka arus menjadi NI , sehingga torsi menjadi

$$11.14$$

$$\tau = NIAB$$

Jika kumparan membentuk sudut sebesar θ dengan medan magnet, seperti pada gambar 11.7c), gaya tidak berubah tetapi setiap tuas lengan berkurang dari $\frac{1}{2}b$ menjadi $\frac{1}{2}b \sin \theta$. Dengan catatan bahwa sudut θ diambil dari sudut antara B dan tegak lurus dengan kumparan, maka gambar 11.7c) torsi menjadi

$$\tau = NIAB \sin \theta$$

Kuantitas NIA disebut momen dipol magnetik dari kumparan,

$$M = NIA$$

$$11.17$$

dan merupakan vektor yang tegak lurus terhadap kumparan.

Momen dipol Magnetik

Dipol magnetik terdiri dari dua kutub berbeda dengan kekuatan yang setara dan dipisahkan oleh jarak yang kecil. Jarum kompas, magnet batang dan juga loop arus merupakan contoh dipol magnetik. Momen dipol magnet merupakan perkalian kekuatan kutub dan jarak antara dua kutub. Jarak antara dua kutub magnet atau dipol magnet merupakan panjang magnet disimbolkan $2l$. Jika m adalah kekuatan setiap kutub magnet maka momen dipol magnet dilambangkan dengan vektor M . Dan direpresentasikan sebagai

$$M = \frac{m}{2l} \quad 11.18$$

Momen dipol magnetik merupakan vektor dan memiliki arah dari kutub selatan magnet ke kutub utara magnet, seperti yang ditunjukkan pada gambar 11.8



Gambar 11.8. Momen dipol magnet

Ketika dipol magnet dianggap sebagai loop arus, momen dipol sebanding dengan arus I (ampere) dikalikan dengan ukuran area A . Dengan arah momen dipol tegak lurus menjauhi sisi permukaan.

$$M = IA$$

Momen dipol magnet juga dapat dianggap sebagai ukuran kemampuan dipol untuk mengubah dirinya menjadi sejajar dengan medan magnet luar. Dalam medan magnet yang seragam, besar momen dipol sebanding dengan jumlah torsi τ . Yang terjadi ketika dipol tegak lurus terhadap medan magnet B , yaitu

$$\tau = MB \sin \theta$$

Dimana θ adalah sudut antara momen dipol M dan medan magnet B . Momen dipol magnetik, memiliki dimensi luas kali arus atau energi dibagi dengan kerapatan fluks magnet. Dalam sistem SI, satuan khusus untuk momen dipol adalah Joule (satuan energi) per tesla (satuan kekuatan medan magnet atau kerapatan fluks magnet).

Magnetisasi dan Suseptibilitas Magnetik

Suseptibilitas magnetik merupakan ukuran kuantitatif sejauh mana suatu bahan dapat dimagnetisasi dalam kaitannya dengan medan magnet yang diberikan. Suseptibilitas magnetik biasanya dilambangkan dengan χ_m sama dengan rasio magnetisasi M dalam material terhadap kekuatan medan magnet yang diberikan H atau

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$

Rasio tersebut merupakan suseptibilitas volume, karena magnetisasi pada dasarnya melibatkan ukuran magnet tertentu (momen dipol) per satuan volume. Bahan magnetik dapat diklasifikasikan sebagai ferromagnetik, paramagnetik atau diamagnetik berdasarkan suseptibilitasnya.

a. Ferromagnetik

Bahan ferromagnetik adalah bahan yang mempunyai resultan medan atomis besar. Hal ini terutama disebabkan oleh momen magnetik spin elektron. Pada bahan ferromagnetik banyak spin elektron yang tidak berpasangan, misalnya pada atom besi terdapat empat buah spin elektron yang tidak berpasangan. Masing-masing spin elektron yang tidak berpasangan ini akan memberikan medan magnetik, sehingga total medan magnetik yang dihasilkan oleh suatu atom lebih besar. Medan magnet dari masing-masing atom dalam bahan ferromagnetik sangat kuat, sehingga interaksi diantara atom-atom tetangganya menyebabkan sebagian besar atom akan mensejajarkan diri membentuk kelompok-kelompok. 8 Kelompok atom yang mensejajarkan dirinya dalam suatu daerah dinamakan domain.

b. Paramagnetik

Bahan paramagnetik adalah bahan yang resultan medan magnet atomis masing-masing atom/molekulnya tidak nol, tetapi resultan medan magnet atomis total seluruh atom/molekul dalam bahan nol. Hal ini disebabkan karena gerakan atom/molekul acak, sehingga resultan medan magnet atomis masing-masing atom saling meniadakan. Bahan ini jika diberi medan magnet luar, maka elektron-elektronnya akan berusaha sedemikian rupa sehingga resultan medan magnet atomisnya searah dengan medan magnet luar. Sifat paramagnetik ditimbulkan oleh momen magnetik spin yang menjadi terarah oleh medan magnet luar. Pada bahan ini, efek diamagnetik (efek timbulnya medan magnet yang melawan medan magnet penyebabnya) dapat timbul, tetapi pengaruhnya sangat kecil. Permeabilitas bahan paramagnetik adalah $\mu > \mu_0$, dan susceptibilitas magnetik bahannya > 0 . χ_m contoh bahan paramagnetik: aluminium, magnesium, wolfram dan sebagainya. Bahan diamagnetik dan paramagnetik mempunyai sifat kemagnetan yang lemah. Perubahan medan magnet dengan adanya bahan tersebut tidaklah besar apabila digunakan sebagai pengisi kumparan toroida. Diamagnetik

Bahan diamagnetik adalah bahan yang resultan medan magnet atomis masing-masing atom atau molekulnya nol, tetapi orbit dan spinnya tidak nol. Bahan diamagnetik tidak mempunyai momen dipol magnet permanen. Jika bahan diamagnetik diberi medan magnet luar, maka elektron-elektron dalam atom akan berubah gerakannya sedemikian hingga menghasilkan resultan medan

magnet atomis yang arahnya berlawanan. Sifat diamagnetik bahan ditimbulkan oleh gerak orbital elektron sehingga semua bahan bersifat diamagnetik karena atomnya mempunyai elektron orbital. Bahan dapat bersifat magnet apabila susunan atom dalam bahan tersebut mempunyai spin elektron yang tidak berpasangan. Dalam bahan diamagnetik hampir semua spin elektron berpasangan, akibatnya bahan ini tidak menarik garis gaya. Permeabilitas bahan diamagnetik adalah $\mu < \mu_0$ dan suseptibilitas magnetiknya $\chi_m < 0$. Contoh bahan diamagnetik yaitu: bismut, perak, emas, tembaga dan seng.

Daftar Pustaka

- Abdullah, M. (2017). *Fisika Dasar II*. Bandung, ITB Press.
- Giancoli, D.C. (2016). *Physics, Principles with Applications*. Sixth Edition, New Jersey: Pearson Education.
- Halliday & Resnick. (2011). *Fundamental of Physics*. 9th Edition, Jearl Waker, Cleveland State University: John Wiley & Sons, Inc.
- Paul, P. U., dkk. (2013). *College Physics, Textbook Equity Edition*. Volume 2 of 3: Cgapter 13-24. Rice University, Texas: OpenStax.
- Samuel, J.L., Jeff, S & William, M. (2016). *University Physics Volume 2*. Rice University, Texas: OpenStax.

Profil Penulis



Dilahirkan di Pompanua pada tanggal 14 Oktober 1982, Sulawesi Selatan. Penulis memasuki jenjang S1 di Jurusan Fisika FMIPA UNM Makassar pada tahun 2001 hingga tahun 2005, di lanjutkan progra, pendidikan Fisika dari tahun 2005-2007. Selanjutnya, pada tahun 2007 hingga 2009, penulis melanjutkan kuliah ke jenjang S2 pada Program Studi Fisika di bidang Material, Program Pascasarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Pada tahun 2017 hingga tahun 2021, penulis melanjutkan kuliah ke jenjang S3 pada Program Studi Doktor Fisika Institut Teknologi Bandung (ITB). Pada tahun 2013, penulis di terima menjadi dosen tetap di Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Alauddin Makassar.

Selama mengajar di Jurusan Fisika, ia telah mengajarkan berbagai mata kuliah di antaranya mata kuliah Fisika Kuantum, Fisika Statistik, Fisika Matematika, Fisika Modern, Fisika Dasar. Adapun penelitian dan karya ilmiah yang telah dihasilkan adalah sebagai berikut: 1) Karakterisasi XRD pada Penumbuhan CNT di atas Substrat Gelas Corning 7059 menggunakan nanokatalis Ag dengan metode HWC-VHF-PECVD. (Prosiding SKF 2018) 2) Study of growth of silver nano catalyst for carbon nano tube growth. (Material today: Proceedings 2021) 3) Optimization of Ag catalyst growth by vacuum thermal evaporation. (Journal, 2021) 3) Pengaruh massa source Ag terhadap ketebalan thin film melalui deposisi vacuum thermal evaporation. (Jurnal 2021) 4) Simulasi monte carlo untuk model ising 2D pada kisi bujur sangkar menggunakan algoritma metropolis. (Jurnal, 2021) 5) Nickel thin film preparation and its characterization as catalyst for HWC in plasma-PECVD-growth graphene. (Material Today: Proceedings, 2021) 6) Effect of precursor gas inlet position relative to hot wire cells in HWC-IP-PECVD systems for low-temperature graphene growth. (Journal, 2022) 7) Studi Karakterisasi XRD pada material CNT melalui variasi tegangan hot wire. (Jurnal, 2023) 8) Pengaruh Variasi Waktu Annealing terhadap Persen Massa Ag melalui Uji Spektroskopi EDX (Sainfis, 2023) 9) Pengaruh Penambahan Inhibitor Alami Ekstrak Limbah Kulit Jagung terhadap Laju Korosi Material Baja ST37 dalam Medium NaCl 3%

Email Penulis: kurniati.abidin@uin-alauddin.ac.id

INDUKSI ELEKTROMAGNETIK

Sudirman

UIN Alauddin Makassar

Pendahuluan

Gaya gerak listrik induksi adalah timbulnya gaya gerak listrik di dalam kumparan yang mencakup sejumlah fluks garis gaya medan magnetik, bilamana banyaknya fluks garis gaya itu divariasi (Bleaney et al., 2013). Dengan kata lain, akan timbul gaya gerak listrik di dalam kumparan apabila kumparan itu berada di dalam medan magnetik yang kuat medannya berubah-ubah terhadap waktu. Secara umum, induksi elektromagnetik adalah gejala timbulnya gaya gerak listrik di dalam suatu kumparan atau konduktor bila terdapat perubahan fluks magnetik pada konduktor tersebut atau bila konduktor bergerak relatif melintasi medan magnetik (Hari, 2019; Putra & Purnomosari, 2016a).

Ketika kutub utara magnet digerakkan memasuki kumparan, jarum galvanometer menyimpang ke salah satu arah (misalnya ke kanan). Jarum galvanometer segera kembali menunjuk ke nol (tidak menyimpang) ketika magnet tersebut didiamkan sejenak di dalam kumparan. Ketika magnet batang dikeluarkan, maka jarum galvanometer akan menyimpang dengan arah yang berlawanan (misalnya ke kiri). Jarum galvanometer menyimpang disebabkan adanya arus yang mengalir dalam kumparan. Arus listrik timbul karena pada ujung-ujung kumparan timbul beda potensial ketika magnet batang digerakkan masuk atau keluar dari kumparan (Nayfeh & Brussel, 2015). Beda potensial yang timbul ini disebut “Gaya Gerak Listrik Induksi (ggl induksi)”.

Ketika magnet batang digerakkan masuk, terjadi penambahan jumlah garis gaya magnetik yang memotong kumparan (galvanometer menyimpang atau ada arus yang mengalir). Ketika batang magnet diam sejenak maka jarum galvanometer kembali ke nol (tidak ada arus yang

mengalir). Ketika batang magnet dikeluarkan terjadi pengurangan jumlah garis gaya magnetik yang memotong kumparan (galvanometer menyimpang dengan arah berlawanan) (Risakotta, 2017).

Induksi Elektromagnetik

Induksi elektromagnetik adalah proses ketika konduktor yang diletakkan di suatu medan magnet yang bergerak/berubah (atau konduktornya yang digerakkan melewati medan magnet yang diam) menyebabkan terproduksinya voltase disepanjang konduktor. Proses induksi elektromagnetik ini menghasilkan arus listrik (Fowler, 1997).

Michael Faraday merupakan ilmuwan yang menemukan fenomena ini pada tahun 1831 dan James Clerk Maxwell merupakan ilmuwan yang mendeskripsikannya secara matematik sebagai Hukum Induksi Faraday. Nama formal persamaan yang mendefinisikan karakteristik induksi medan elektromagnetik dari fluks magnetik (perubahan pada medan magnet) disebut sebagai Hukum Faraday, yang kemudian digeneralisasikan menjadi persamaan Maxwell-Faraday, satu dari empat persamaan pada teori elektromagnetik oleh James Clerk Maxwell; persamaan ini mendefinisikan hubungan antara perubahan medan listrik dan medan magnet. Selain itu, terdapat Hukum Lorentz yang mendeskripsikan arah dari medan induksi (Baigrie, 2007; Parker, 2007). Proses induksi elektromagnetik dapat bekerja pula secara kebalikannya, jadi pergerakan arus listrik dapat menghasilkan sebuah medan magnetik. Faktanya, sebuah magnet biasa memiliki medan magnet akibat gerakan individual elektron-elektron dalam atom-atom penyusun magnet; elektron-elektron tersebut bergerak secara seragam sehingga menghasilkan medan magnet uniform. Induksi elektromagnetik telah diterapkan pada berbagai teknologi seperti komponen-komponen elektrikal: induktor dan transformator, dan alat-alat yang sangat krusial: motor elektrik dan generator.

Gaya Gerak Listrik Induksi

Gaya gerak listrik (ggl) merupakan beda potensial antara kedua ujung sumber listrik (misalnya baterai) ketika tidak mengalirkan arus listrik. **Sumber gaya gerak listrik** merupakan komponen yang mengubah energi tertentu menjadi energi listrik misalnya baterai atau generator

listrik. Ggl dilambangkan dengan “ ε ” atau terkadang dituliskan sebagai “ggl” dengan satuan volt (V) (Slater & Frank, 1969).

Gaya gerak listrik induksi (ggl induksi) adalah beda potensial yang timbul pada ujung-ujung kumparan akibat adanya perubahan medan magnetik. Dengan kata lain, **ggl induksi** adalah ggl yang timbul karena induksi elektromagnetik. Besarnya ggl induksi dipengaruhi oleh laju perubahan fluks magnetik dan banyaknya lilitan kumparan. Terdapat tiga faktor yang mempengaruhi terjadinya perubahan fluks magnetik, yaitu:

1. Luas bidang kumparan yang melingkupi garis gaya medan magnetik.
2. Perubahan induksi magnetiknya.
3. Perubahan sudut antara arah medan magnet dengan garis normal bidang kumparan.

(Rusydi et al., 2020)

Hukum Faraday

Seperti yang sebelumnya disebutkan bahwa ggl induksi dipengaruhi oleh laju perubahan fluks magnetik dan jumlah lilitan kumparan. Hal tersebut digambarkan melalui persamaan pada **Hukum Faraday** berikut.

$$\varepsilon = N \frac{d\Phi}{dt}$$

Keterangan:

ε = ggl induksi (V)

N = jumlah lilitan

$d\Phi/dt$ = laju perubahan fluks (Wb/s)

$d\Phi$ = perubahan fluks magnetik (Weber) (Wb)

dt = selang waktu (s)

Maka dari itu, dapat dipahami bahwa **Hukum Faraday** berbunyi:

“Gaya gerak listrik (ggl) induksi yang timbul antara ujung-ujung suatu loop penghantar berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar tersebut“

Hukum Lenz

Jika kamu perhatikan persamaan di atas, terdapat tanda negatif di salah satu ruas. Hal ini disebabkan oleh ggl induksi yang arus medan magnetnya berlawanan dengan asal perubahan fluksnya. Hal tersebut sebagaimana dinyatakan oleh **Hukum Lenz** yang berbunyi:

“Ggl induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetnya berlawanan dengan asal perubahan fluks“

Hukum Lenz

Induktor

Induktor atau disebut juga coil adalah komponen elektronika pasif yang berbentuk kumparan dari susunan lilitan kawat. Induktor memiliki kemampuan untuk menyimpan energi magnet. Kemampuan ini disebut dengan induktansi yang satuan unitnya adalah Henry (H). Pengertian Induktor adalah komponen elektronika pasif yang terdiri dari coil atau lilitan yang terdiri dari inti bisa berupa ferrit, besi bahkan udara dan bisa menghasilkan medan magnet arus induksi pada saat terminal kakinya di aliri arus listrik AC. Sebaliknya induktor bisa menghasilkan arus listrik jika diberi medan magnet (Fowler, 1997; Parker, 2007).

Induksi yang dihasilkan oleh sebuah induktor sangat tergantung pada banyaknya lilitan induktor, penampang lilitan yang dipakai, bahan logam yang digunakan dan seberapa panjang kumparan induktor tersebut. Dalam hal mengalirkan arus listrik, komponen ini adalah kebalikan dari fungsi kapasitor. Pada kapasitor bersifat meneruskan arus AC yang diterimanya serta memblokir arus DC sedangkan pada induktor sifatnya memblokir arus AC dan meneruskan arus DC. Satuan yang digunakan untuk induktor adalah Henry (H)

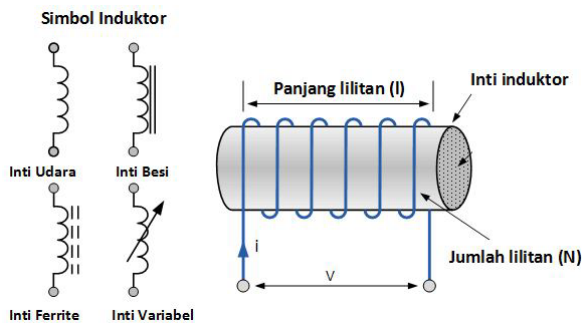


Untuk mempermudah pemahaman pada artikel kali ini akan dibahas secara sederhana mengenai:

Simbol Induktor

Simbol komponen elektronika untuk induktor terdapat beberapa jenis tergantung jenis inti yang digunakan dan apakah bernilai tetap atau bisa diubah, berikut dibawah ini beberapa diantaranya:

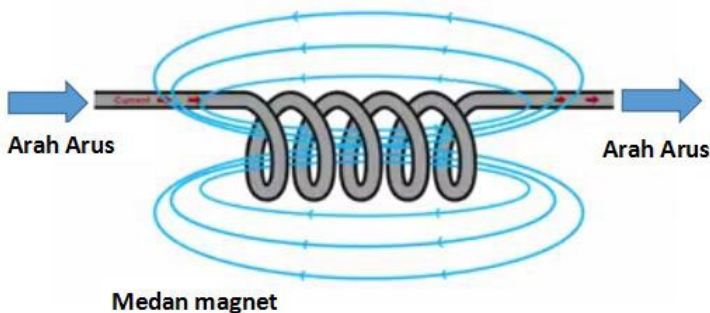
1. Air-core, induktor inti udara
2. Iron-core, induktor inti besi
3. Ferrite-core, induktor inti ferrite
4. Variable, induktor dengan nilai variabel



Cara Kerja Induktor

Cara kerja induktor pada dasarnya bekerja menurut hukum Faraday dimana pada saat induktor diberi arus (i) yang melewati kawat lilitan maka akan timbul medan magnet ($N\Phi$) di sekitar induktor tersebut berbanding lurus dengan besar medan magnet tergantung dari besarnya

arus listrik yang diberikan. Sehingga secara tidak langsung induktor bisa mengubah arus listrik yang diterima dengan tidak mengubah tegangannya menjadi bentuk medan magnet yang disebut juga induktansi (Slater & Frank, 1969).



Kemampuan induktansi ini dihitung dalam satuan Henry dan dengan simbol L. Seperti halnya satuan pada kapasitor terdapat banyak satuan ukuran yang lebih kecil yaitu secara berurutan miliHenry (mH), mikroHenry (μH), nanoHenry (nH) dan picoHenry (pH). Besarnya nilai induktansi sebuah induktor dipengaruhi berbagai hal diantaranya yaitu:

1. Ukuran lilitan induktor dimana semakin pendek maka akan semakin tinggi juga induktansinya
2. Jumlah lilitan, nilai induktansi akan berbanding lurus dengan jumlah lilitan yang ada berarti semakin banyak lilitannya semakin besar juga induktansinya.
3. Diameter induktor, semakin besar diameter maka semakin besar juga induktansinya
4. Inti induktor, yaitu permeabilitas dari bahan inti yang digunakan bisa berupa besi, ferrite atau udara

Fungsi Induktor

Secara sederhana fungsi induktor adalah menghasilkan medan magnet dari arus listrik yang melintasinya. Komponen induktor banyak digunakan secara luas pada perangkat elektronika maupun listrik, fungsi yang paling banyak dimanfaatkan yaitu sebagai filter untuk frekuensi tertentu yang aplikasinya biasa digunakan pada penalaan frekuensi / tuning atau sebagai penghilang dengung maupun noise,

meneruskan arus searah DC serta bisa juga untuk melipatgandakan tegangan (Bleaney et al., 2013).

Berikut beberapa fungsi lainnya dari induktor:

1. Filter frekuensi tertentu
2. Menahan arus AC/bolak balik
3. Meneruskan arus DC/ searah
4. Pelipat ganda tegangan
5. Pembangkit getaran
6. Dua induktor yang dikopel akan membentuk Transformator

Penggunaan Induktor

Induktor secara luas digunakan pada perangkat elektronika khususnya pada arus AC, banyak juga digunakan pada perangkat radio. Berikut ini beberapa perangkat elektronika yang menggunakan induktor dan memanfaatkan cara kerjanya:

1. Filter frekuensi pada perangkat radio
2. Transformator
3. Motor listrik
4. Speaker dan Mic
5. Relay

Selain itu banyak juga jenis jenis komponen induktor yang biasa digunakan di rangkaian elektronika, misalnya seperti gambar dibawah ini yang merupakan komponen yang termasuk sering ditemukan di rangkaian



Bahkan dalam circuit dengan mainboard multi layer pun akan cukup mudah ditemukan Induktor smd. Apa itu induktor smd ? jenis induktor smd (*Surface Mounting Devices*) memiliki ukuran yang sangat kecil jika dibandingkan dengan induktor biasa karena sesuai penggunaannya pada multi layer (Risakotta, 2017).



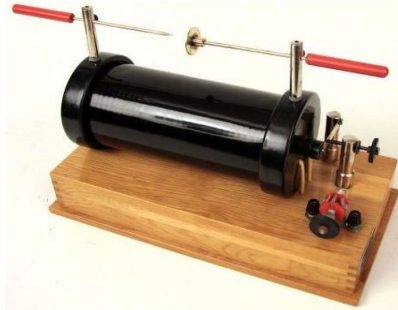
Gambar induktor smd

Namun walaupun ukurannya lebih kecil berkali kali lipat secara fungsi dan performa sama saja. Cara membaca induktor smd pun sangat mudah karena terdapat kode digit, dimana digit pertama dan kedua merupakan nilai angka sedangkan digit ketiga merupakan faktor pengali.

Induktor Ruhmkorff

Cara kerja Induktor sebenarnya tidak berbeda jauh dengan cara kerja transformator, bahkan terdapat jenis **Induktor Ruhmkorff** yang mampu menghasilkan tegangan tinggi dengan menggunakan arus searah yang dihubungkan ke coil/ lilitan kawat primer nya, karena

kawat sekunder nya memiliki jumlah lilitan yang lebih banyak maka akan timbul tegangan yang lebih tinggi pada sekundernya.



Gambar Induktor Ruhmkorff

Induktor Ruhmkorff juga memiliki inti seperti layaknya transformator yang biasanya berupa batang besi lunak, kebanyakan jenis induktor ini hanya digunakan untuk keperluan edukasi sehingga jarang ditemukan pada circuit elektronik.

Cara kerja Induktor Ruhmkorff adalah dengan melengkapi sebuah saklar otomatis yang disebut dengan interuptor yang berfungsi sebagai pemutus dan penyambung arus DC yang diberikan ke kumparan primer

Karena pemutusan arus ini dilakukan secara simultan maka menimbulkan perubahan medan magnet pada coil primer, yang selanjutnya juga akan berpengaruh ke bagian coil sekunder sehingga cara kerja ini mirip dengan transformator hanya saja dengan sumber daya arus searah/ DC.

Aplikasi Induksi Elektromagnetik

Elektromagnetik adalah suatu peristiwa perubahan sifat dari logam baja atau besi menjadi sebuah medan magnet yang terdapat di dalam kumparan dengan muatan listrik. Sedangkan elektromagnet ialah medan magnet yang sengaja diciptakan dengan cara melilitkan sebuah kawat pada konduktor berupa logam baja ataupun besi selanjutnya dihubungkan dengan aliran listrik. Elektromagnet juga dikenal dengan istilah magnet listrik. Dengan adanya konsep tersebut, dapat mempermudah beberapa pekerjaan dengan memanfaatkan prinsip elektromagnetik Beberapa contoh penerapan konsep elektromagnetik dalam kehidupan diantaranya adalah:

1. **Pengeras Suara**

Pengeras suara dalam penggunaannya memanfaatkan prinsip elektromagnetik. Komponen utama yang terdapat pada alat elektronik ini berupa magnet yang terpasang secara permanen dengan elektromagnetik sebagai daya penyokongnya. Cara kerja dari alat ini adalah mengubah energi listrik menjadi bunyi dengan berbagai mekanisme khusus. Komponen voice coil di dalam pengeras suara akan menciptakan medan elektromagnetik yang akan melakukan interaksi dengan komponen cone yang ada di dalam magnet. Aliran listrik yang terdapat di dalam voice coil akan menciptakan suatu medan magnet yang berubah arah dan mengakibatkan adanya pergerakan menarik dan melepas aliran listrik dengan sangat cepat. Dengan kronologi tersebutlah suara keras dapat dihasilkan (Putra & Purnomosari, 2016b).

2. **Microfon**

Prinsip kerja elektromagnetik pada microfon adalah mengubah energi suara menjadi energi listrik. Ketika suara memasuki microfon, maka akan timbul gelombang yang akan melewati diafragma yang berupa membrane plastik. Membrane plastik tersebut akan bergetar seiring dengan volume gelombang suara yang memasuki microfon. Pada saat yang bersamaan, bagian voice coil yang terletak di belakang diafragma juga akan turut bergetar bersamaan dengan gelombang suara yang masuk. Selanjutnya gelombang bunyi akan bergesekan dengan medan magnet yang kemudian akan memunculkan sebuah energi listrik di dalam magnet. Mulai dari sinilah gelombang bunyi selanjutnya akan diubah menjadi suara. Listrik yang terdapat di dalam medan magnet selanjutnya akan bergerak menuju ke arah amplifier. Melalui amplifier inilah gelombang suara yang telah dihasilkan akan keluar dan dapat didengar (Hari, 2019).

3. **Pintu Kulkas**

Penerapan prinsip elektromagnetik pada kulkas terbilang cukup sederhana. Di sekitar permukaan pintu kulkas umumnya telah terpasang magnet yang akan menarik material besi pada penampang pintu. Gaya tarik-menarik inilah yang membuat pintu kulkas dapat menutup dengan cukup kuat dan rapat.

4. **Kompas**

Pada jarum kompas telah terpasang dua buah magnet tetap yang senantiasa menunjuk ke arah utara dan selatan. Hal ini disebabkan

bumi memiliki medan magnet yang amat besar di bagian wilayah utara dan selatan. Sifat magnetik yang senantiasa bertolak belakang ini menjadikan jarum kompas utara menunjuk ke arah selatan dan begitupun sebaliknya. Mengenai hal tersebut, kompas yang banyak diproduksi saat ini telah dimodifikasi sedemikian rupa dengan akurasi ketepatan penunjuk arah yang begitu otentik, sehingga tidak perlu khawatir tertukar arah.

5. **Dynamo Sepeda**

Dynamo dimanfaatkan sebagai sumber penghasil energi penerangan bagi sepeda. Dynamo menghasilkan energi listrik ketika roda bergerak. Pergerakan roda sepeda akan memutar turbin dynamo yang selanjutnya akan memutar magnet di dalam kumparan tetap. Perputaran magnet tersebut akan menghasilkan medan elektromagnetik yang dengan perlahan akan berubah menjadi energi listrik. Energi listrik inilah yang membuat lampu menyala.

6. **Pengangkat Besi**

Prinsip elektromagnetik pada pengangkat besi pada prinsipnya sama halnya seperti pintu kulkas yang berupa material besi dan penopang pintu sebagai magnetnya. Pengangkat sebagai magnet, sedangkan material besi sebagai benda yang ditarik oleh magnet. Pengangkat besi lebih banyak digunakan dalam bidang industri seperti halnya pengangkat peti kemas, pemilah sampah logam, mesin pengangkat logam berat, dan lain sebagainya. Cara kerjanya adalah dengan mengalirkan listrik terhadap kumparan yang dililitkan pada logam besar. Pada saat listrik mengalir, kumparan tersebut akan memiliki muatan magnet yang mampu menarik material logam. Sifat kemagnetan akan tetap bertahan selama listrik masih disalurkan pada kumparan. Jika aliran listrik diputus, maka logam yang semula telah diangkat dapat terlepas.

7. **Bel Listrik**

Bel listrik lebih banyak dimanfaatkan sebagai simbol, peringatan, isyarat, atau penanda khusus terhadap suatu peristiwa. Alat ini pada umumnya digunakan di sekolah, pintu halaman rumah, dan acara perlombaan tertentu. Bunyi nyaring yang dihasilkan oleh bel listrik berasal dari aliran listrik yang muncul pada saat tombol pengaktifan ditekan. Aliran listrik tersebut selanjutnya akan memberikan energi elektromagnetik menuju interruptor. Interruptor inilah yang selanjutnya akan menarik pemukul sehingga mampu

menimbulkan bunyi nyaring. Jika tombol pengaktifan berhenti ditekan, maka secara otomatis listrik berhenti mengalir sehingga bunyi bel pun akan berhenti.

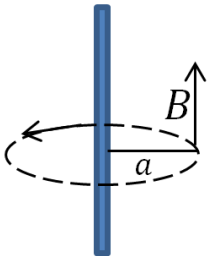
8. Papan Catur

Penerapan prinsip elektromagnetik pada papan catur juga dapat dikatakan amat sederhana. Pion-pion catur umumnya dibuat bidak kayu yang pada bagian alasnya dibubuhi magnet tetap. Selanjutnya pada bagian alas catur dibuat dengan bahan dasar besi. Dengan demikian, pion-pion catur tidak akan mudah untuk terjatuh karena adanya sifat kemagnetan yang terdapat pada pion catur. Baik pion catur ataupun alas catur, keduanya saling menunjukkan gaya tarik-menarik berdasarkan prinsip kemagnetan.

Contoh Soal

Dalam bab induksi elektromagnetik ini, kamu akan menemukan berbagai konsep yang digunakan, seperti GGL Induksi, fluks magnetik, Hukum Faraday, Hukum Lenz dan Induktansi Diri. Untuk berlatih menyelesaikan soal-soal mengenai induksi elektromagnetik, langsung aja yuk kita simak latihan soal di bawah ini.

1. Sebuah kawat lurus panjang dialiri arus listrik sebesar 40 A . Jika permeabilitas vakum sebesar $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb/Am}$. Besarnya induksi magnet pada sebuah titik yang jaraknya 10 cm dari pusat kawat tersebut adalah...



- a. $5 \cdot 10^{-5} \text{ Tesla}$
- b. $6 \cdot 10^{-5} \text{ Tesla}$

- c. $7 \cdot 10^{-5}$ Tesla
- d. $8 \cdot 10^{-5}$ Tesla
- e. $9 \cdot 10^{-5}$ Tesla

Pembahasan:

Berdasarkan rumus kuat medan magnet $B = \frac{\mu_o I}{2\pi a}$

Arus listrik sebesar **40 A**

Jarak titik sebesar **10 cm**

Maka

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi a}$$

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}(40)}{2\pi(0,1)}$$

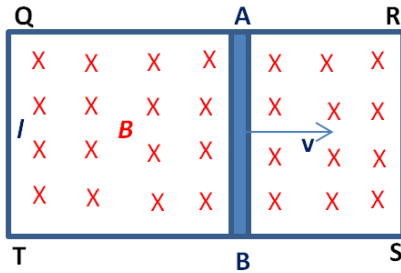
$$B = \frac{4 \cdot 10^{-7}(40)}{0,2}$$

$$B = 800 \cdot 10^{-7}$$

$$B = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Tesla}$$

Jadi jawabannya adalah **D**

2. Suatu rangkaian QRST terletak dalam zona medan magnet dengan kuat medan sebesar **$0,5 \text{ Wb/m}^2$** dan arahnya masuk bidang kertas. Bila pada rangkaian tersebut terdapat kawat AB dengan lebar sebesar **50 cm** dan digeser ke kanan dengan kecepatan **4 m/s** , maka gaya gerak listrik dan arahnya adalah...



- $\varepsilon = 1$ volt (dengan arah dari A ke B)
- $\varepsilon = 1$ volt (dengan arah dari B ke A)
- $\varepsilon = 2$ volt (dengan arah dari A ke B)
- $\varepsilon = 2$ volt (dengan arah dari B ke A)
- $\varepsilon = 3$ volt (dengan arah dari A ke B)

Pembahasan:

Hukum Lenz mengikuti persamaan $\varepsilon = Blv$

Arah gaya lorentz F_L selalu berlawanan dengan arah gerak v

Berdasarkan kaidah tangan kanan arus induksi berarah ke atas

Maka

$$\varepsilon = Blv$$

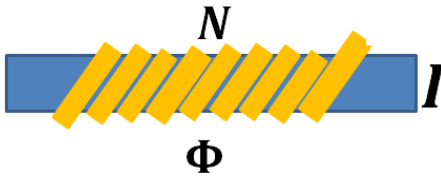
$$\varepsilon = (0,5)(0,5)(4)$$

$$\varepsilon = 1 \text{ volt (dengan arah dari B ke A)}$$

Jadi jawabannya adalah **B**

- Suatu kumparan memiliki jumlah lilitan sebanyak **123 lilitan**. Jika arus listrik yang mengalir pada kumparan tersebut sebesar **3,33 ampere** dan fluks

magnet yang terbentuk sebesar 5,55 weber, maka induktansi diri dari kumparan tersebut adalah...



- a. 206 Henry
- b. 205 Henry
- c. 204 Henry
- d. 203 Henry
- e. 202 Henry

Pembahasan

Besar induktansi diri suatu kumparan dirumuskan dengan $L = \frac{N\Phi}{I}$

Arus listrik sebesar 3,33 ampere dengan fluks magnet sebesar 5,55 weber

Jumlah lilitan sebanyak 123 lilitan

Maka

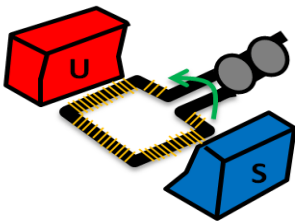
$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

$$L = \frac{(123)(5,55)}{(3,33)}$$

$$L = 205 \text{ Henry}$$

Jadi jawabannya adalah **B**

4. Suatu generator AC sederhana memiliki luas kumparan sebesar 1000 cm^2 yang terdiri atas 111 lilitan diletakkan dalam suatu medan magnet dengan induksi magnet sebesar $1,1 \text{ Wb/m}^2$ kemudian kumparan tersebut diputar. Waktu yang dibutuhkan kumparan untuk berputar dalam satu periode sebesar 1 detik. Selama kumparan berputar terjadi perubahan orientasi bidang terhadap medan magnet. Tentukan besar gaya gerak listrik saat $t = 11$ detik!



- a. $71,3$ volt
- b. $72,3$ volt
- c. $73,3$ volt
- d. $74,3$ volt
- e. $75,3$ volt

Pembahasan

Nilai ggl pada generator AC selalu berubah setiap saat

$$\varepsilon = \varepsilon_{maks} \sin \omega t$$

Berdasarkan rumus ggl magnet $\varepsilon_{maks} = NBA \omega$

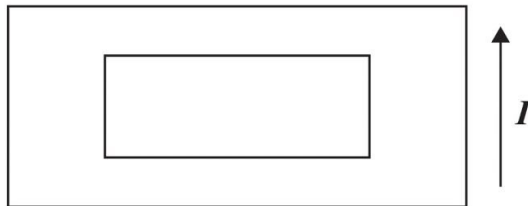
Kecepatan sudut terhadap periode berlaku $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Maka

$$\begin{aligned} \varepsilon_{maks} &= N B A \omega \\ \varepsilon_{maks} &= N B A \left(\frac{2\pi}{T} \right) \\ \varepsilon_{maks} &= (111)(1,1)(0,1) \left(\frac{2(3,14)}{1} \right) \\ \varepsilon_{maks} &= (111)(1,1)(0,1)(6,28) \\ \varepsilon_{maks} &= 76,67 \text{ volt} \\ \varepsilon &= \varepsilon_{maks} \sin \omega t \\ \varepsilon &= (76,67) \sin (6,28 \cdot 11) \\ \varepsilon &= (76,67) \sin (69) \\ \varepsilon &= (76,67)(0,93) \\ \varepsilon &= 71,33 \text{ volt} \end{aligned}$$

Jadi jawabannya adalah A

5. Dua kawat persegi panjang ditempatkan seperti pada gambar.



Apabila arus listrik I pada kawat luar mengalir berlawanan dengan arah jarum jam dan bertambah maka arus listrik induksi pada kawat dalam akan

- Mengalir searah jarum jam dan konstan
- Mengalir searah jarum jam dan membesar
- Mengalir berlawanan arah jarum jam dan membesar
- Mengalir berlawanan arah jarum jam dan mengecil
- Mengalir berlawanan arah jarum jam dan konstan

Pembahasan

Ketika arus listrik I mengalir pada kawat luar maka di sekitar kawat tersebut timbul induksi magnet. Karena arus yang mengalir bertambah (ada perubahan) maka terjadi perubahan induksi magnet. Perubahan induksi magnet ini menyebabkan kawat dalam terinduksi. Maka

timbullah arus induksi pada kawat dalam. Sesuai dengan hukum Lenz, arah arus induksi yang timbul menentang arah penyebabnya. Sehingga arah arus induksi tersebut searah dengan arah jarum jam. Karena arus I yang melalui kawat luar semakin bertambah maka perubahan induksi magnet pun juga semakin bertambah. Akibatnya, arus induksi yang terjadi pada kawat dalam juga semakin membesar.

Jadi, arus induksi pada kawat dalam mengalir searah jarum jam dan membesar.

Jadi jawaban yang paling tepat adalah **B**

Daftar Pustaka

- Baigrie, B. (2007). *Electricity and magnetism: a historical perspective*. Greenwood Publishing Group.
- Bleaney, B. I., Bleaney, B. I., & Bleaney, B. (2013). *Electricity and Magnetism, Volume 2* (Vol. 2). Oxford University Press (UK).
- Fowler, M. (1997). Historical beginnings of theories of electricity and magnetism. *Recuperado El*, 23(5), 2012.
- Hari, B. S. (2019). *Mengenal Fisika Listrik Dan Magnet*. Penerbit Duta.
- Nayfeh, M. H., & Brussel, M. K. (2015). *Electricity and magnetism*. Courier Dover Publications.
- Parker, E. N. (2007). *Conversations on electric and magnetic fields in the cosmos*. Princeton University Press.
- Putra, V. G. V., & Purnomosari, E. (2016a). *Pengantar listrik magnet dan terapannya* (Vol. 1). CV. Mulia Jaya.
- Putra, V. G. V., & Purnomosari, E. (2016b). *Pengantar listrik magnet dan terapannya* (Vol. 1). CV. Mulia Jaya.
- Risakotta, D. R. (2017). *Pembelajaran Konsep Listrik dan Magnet*. Syiah Kuala University Press.
- Rusydi, F., Yasin, M., & Trilaksana, H. (2020). *Buku Ajar Listrik dan Magnet: Seri "Teori Medan & Elektrostatik."* Airlangga University Press.
- Slater, J. C., & Frank, N. H. (1969). *Electromagnetism*. Courier Corporation.

Profil Penulis



Sudirman, S.Pd, M.Ed

Lahir di Tanete pada tanggal 17 Agustus 1990 dari pasangan Ruddin dan Sa'be. Menikah dengan Andi Asti Handayani, S.E.,M.Ak dan dikarunia 2 orang anak yaitu A. Nur Ogie Mapparurung dan A. Nur Ovie Mapparurung. Pendidikan formal dimulai dari Sekolah Dasar (SD) Inpres No. 169 Bontoparang Kec. Bangkala Barat Kab. Jeneponto pada tahun 1998 dan lulus tahun 2004, pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 1 Bangkala Barat Kab. Jeneponto dan lulus pada tahun 2006, tahun 2006 penulis melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 1 Takalar Kab. Takalar dan lulus pada tahun 2009. Penulis menempuh studi jenjang S1 di Program Studi Pendidikan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Makassar dan selesai pada tahun 2014 dengan predikat *cumlaude*. Lulus beasiswa LPDP tahun 2014 dan melanjutkan pendidikan magister (M.Ed by Research) di National University of Ireland pada tahun 2015 dan selesai pada tahun 2017 dengan predikat *Magna Cumlaude* dan hasil thesis dengan *Outstanding Research Award*. Selama studi magister, penulis juga pernah bekerja sebagai *teaching assistant* pada *Eureka Laboratory, School of Education, University College Cork, Ireland* Tahun 2016 hingga 2017. Saat ini tercatat sebagai mahasiswa program doktor ilmu pendidikan di Pasca Sarjana, Universitas Negeri Makassar.

Penulis diangkat menjadi Dosen tetap di Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar pada tahun 2018. Penulis aktif menulis *bookchapter* rumpun Matematika dan IPA serta bidang pendidikan. Karya akademik yang telah dihasilkan antara lain; Buku dengan judul; *Belajar dan Pembelajaran, Teori dan Inovasi Pendidikan Masa Depan, Pengantar Pendidikan, Strategi Pembelajaran berbasis digital, Konsep dan Model Pembelajaran Karakter, Dasar-dasar Ilmu Pendidikan, Pengantar Statistika 2, Kalkulus Differensial, Perpindahan Kalor, Kinematika Partikel, Kimia Dasar, Proses Belajar dan Pembelajaran, Pengantar Pendidikan, Pengembangan Profesi Guru, Implementasi Pembelajaran Abad 21 pada berbagai bidang ilmu dan Strategi Pembelajaran Berbasis Digital*. Menulis jurnal baik nasional maupun internasional, serta menjadi reviewer jurnal nasional dan internasional.

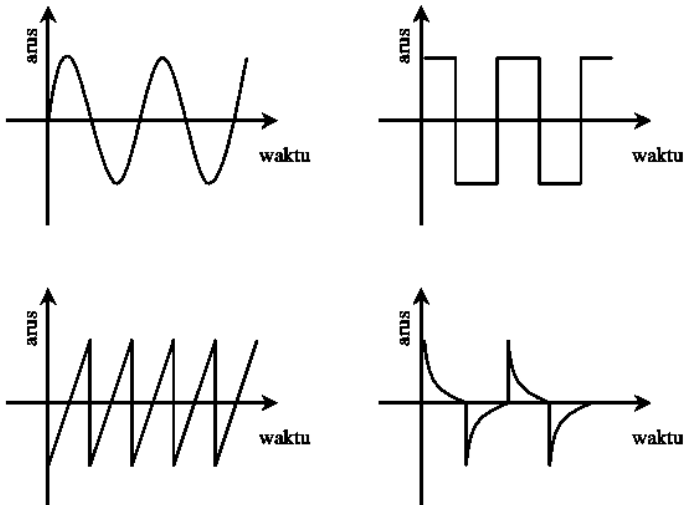
Email : Sudirman.raja@uin-alauddin.ac.id

RANGKAIAN LISTRIK BOLAK BALIK

Mawarni Saputri
Universitas Syiah Kuala

Arus Bolak-balik

Arus bolak-balik adalah arus listrik dimana besar dan arah arusnya berubah-ubah secara bolak-balik. Pada suatu saat arah arus ke kanan, kemudian berubah menjadi ke kiri, kemudian ke kanan, ke kiri, dan seterusnya. Kalau digambarkan dalam bentuk kurva, maka contoh kurva arus bolak-balik ditunjukkan dalam Gambar 13.1

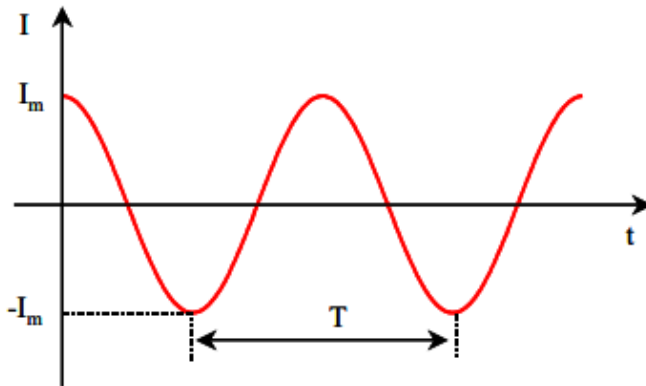


Gambar 13.1 Contoh grafik arus bolak-balik.

Berdasarkan gambar 13.1 terlihat bahwa:

- Pada grafik (a) Arus bolak-balik berubah secara sinusoidal, setengah periode arus bergerak dalam satu arah dan setengah periode lainnya arus bergerak dalam arah sebaliknya.
- Pada grafik (b) Arus bolak-balik berubah secara persegi, dalam setengah periode arus bergerak dalam satu arah dan setengah periode lainnya arus bergerak dalam arah sebaliknya.
- Pada grafik (c) Arus bolak-balik berubah dengan pola segitiga.
- Pada grafik (d) Arus bolak-balik berubah secara transien.

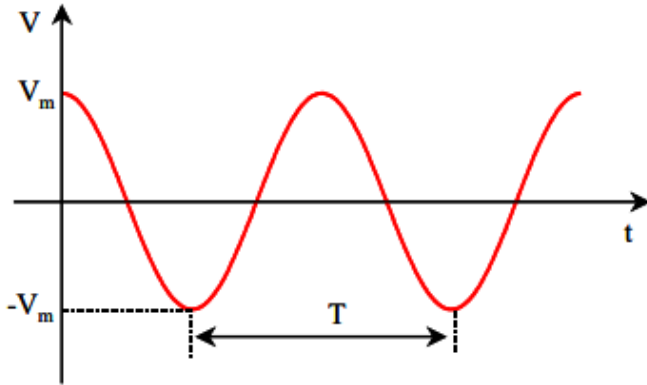
Bentuk arus bolak-balik yang paling sederhana adalah arus sinusoidal dapat dilihat pada gambar 13.2.



Gambar 13.2 Contoh kurva arus bolak-balik

Tegangan Bolak-Balik

Tegangan bolak-balik adalah tegangan yang besarnya berubah-ubah secara kontinu dan polaritasnya berubah secara periodik. Bentuk tegangan bolak-balik yang paling sederhana adalah arus sinusoidal dapat dilihat pada gambar 13.3.



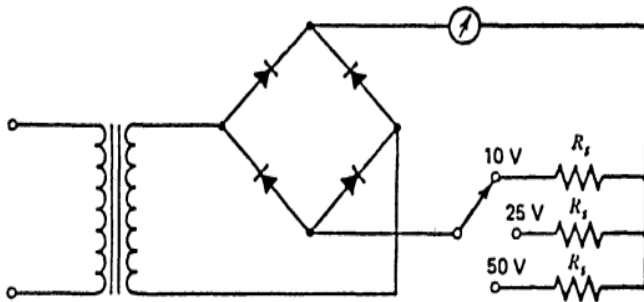
Gambar 13.3 Contoh kurva tegangan bolak-balik

Tegangan dan arus bolak-balik seperti pada gambar 13.2 dan 13.3 di atas dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut.

$$v = V_m \sin \omega t = V_m \sin 2\pi f t = V_m \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

$$i = I_m \sin \omega t = I_m \sin 2\pi f t = I_m \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

Pengukuran besaran tegangan bolak-balik dapat diperoleh dengan menggunakan rangkaian penyearah yang berfungsi untuk mengubah tegangan bolak-balik menjadi tegangan searah dan menggunakan besaran tegangan searah tersebut sebagai patokan untuk menunjukkan besaran yang sesuai.



Gambar 13.4 Pengukuran tegangan bolak-balik dengan menggunakan penyearah gelombang penuh

Rangkaian penyearah yang biasa digunakan adalah dengan menggunakan dioda germanium atau silikon. Dioda yang digunakan bisa terdiri dari satu dioda untuk penyearah setengah gelombang atau terdiri dari empat dioda dalam bentuk rangkaian jembatan dan menghasilkan penyearah gelombang penuh (Jones, 1983).

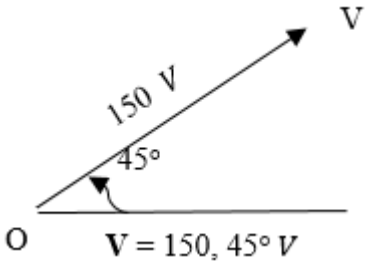
Fasor dan Diagram Fasor

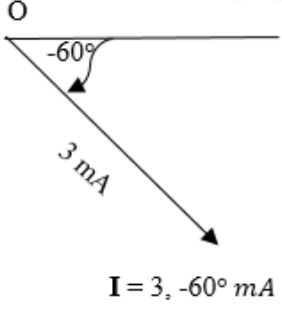
Fasor adalah bilangan kompleks yang merepresentasikan amplitudo dan fasa dari suatu sinusoidal. Untuk menyelesaikan permasalahan rangkaian AC (*alternating current*) yang sinyalnya berupa sinusoidal digunakanlah fasor. Sebuah fasor bukanlah sebuah besaran fisika yang riil dengan dengan sebuah arah dalam ruang seperti kecepatan, momentum, atau medan listrik. Akan tetapi fasor adalah kesatuan geometris yang membantu kita untuk menjelaskan dan menganalisis besaran fisika yang berubah secara sinusoidal terhadap waktu (Sears & Zemansky, 2004).

Panjang fasor atau besarnya adalah amplitudo atau nilai maksimum dari fungsi cosinus. Pada buku ini, fasor akan didefinisikan dari fungsi cosinus. Jika sebuah tegangan atau arus dinyatakan sebagai sebuah sinus, maka ia akan diubah menjadi sebuah cosinus dengan mengurangkan 90° dari fase itu (Edminister, 1997)

Perhatikan contoh pada tabel 13.1 yang menunjukkan bahwa fasor berupa segmen garis yang diarahkan dan wujudnya berupa vektor. Sudut fasa dari fungsi cosinus adalah sudut pada fasor.

Tabel 13.1 Contoh representasi fasor

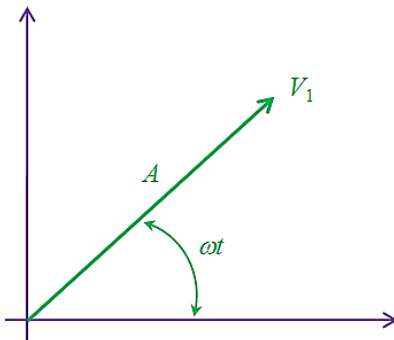
Fungsi	Representasi Fasor
$V = 150 \cos (500t + 45^\circ) \quad (V)$ $i = 3 \sin (2000t + 30^\circ) \quad (mA)$	

Fungsi	Representasi Fasor
$i = 3 \cos (2000t - 60^\circ)$ (mA)	

Untuk menyatakan tegangan dan arus yang berubah secara sinusoidal maka digunakan diagram vektor yang berotasi yang mengandung fasor disebut sebagai **diagram fasor**. Dalam diagram fasor, sebuah fungsi trigonometri digambarkan sebagai sebuah vektor. Panjang vektor tersebut sama dengan amplitudo fungsi dan sudut yang dibentuk vektor dengan arah sumbu datar sama dengan fase fungsi tersebut. Contoh:

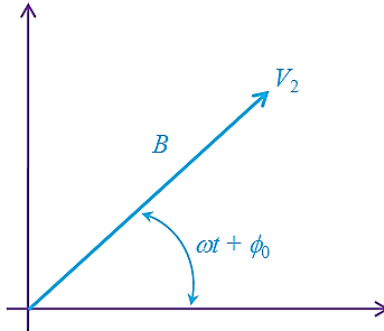
$$V_1 = A \cos(\omega t)$$

Amplitudo fungsi di atas adalah A dan fasenya adalah ωt . Jika direpresentasikan dalam diagram fasor maka akan diperoleh vektor dengan panjang A dan membentuk sudut ωt terhadap sumbu datar, seperti ditunjukkan dalam gambar 13.5.



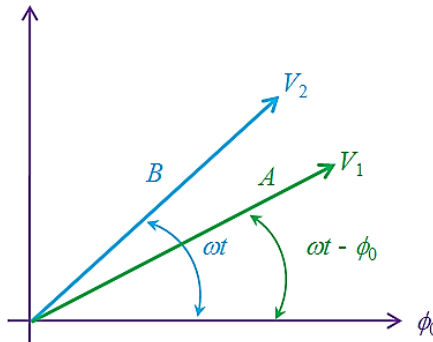
Gambar 13.5 Diagram fasor untuk fungsi $V_1 = A \cos(\omega t)$

Contoh lain adalah fungsi $V_2=B\cos(\omega t+\phi_0)$. Diagram fasor fungsi ini tampak pada gambar 13.6.



Gambar 13.6 Diagram fasor untuk fungsi $V_2=B\cos(\omega t+\phi_0)$

Namun, kita dapat menggambar dengan cara yang berbeda jika pada gambar 13.5 dan 13.6 sumbu datar memiliki fase 0. Sebenarnya kita dapat memberikan fase berapa pun pada sumbu datar. Namun, sekali fase itu diberikan, maka penggambaran fungsi lain harus menyesuaikan dengan fase sumbu datar tersebut. Misalkan, sumbu datar kita berikan fase ϕ_0 maka fungsi V_1 dan V_2 berubah menjadi gambar 13.7.



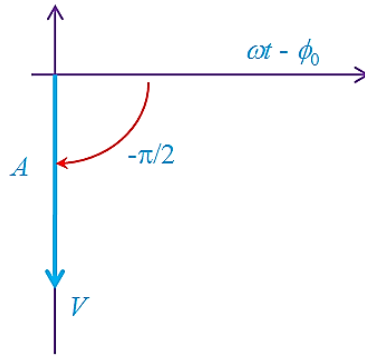
Gambar 13.7 Diagram fasor untuk fungsi $V_1=A\cos(\omega t)$ dan $V_2=B\cos(\omega t+\phi_0)$ pada koordinat baru

Untuk menggambarkan diagram fasor, lebih dianjurkan semua fungsi dinyatakan dalam **fungsi kosinus**. Jika dijumpai fungsi sinus, maka fungsi tersebut harus diubah ke fungsi kosinus dengan menggunakan hubungan $\sin\theta=\cos(\theta-\pi/2)$.

Contoh: $V=A\sin(\omega t-\phi_0)$.

Langkah pertama adalah mengubah fungsi di atas menjadi fungsi kosinus menjadi $V=A\cos(\omega t-\phi_0-\pi/2)$,

Selanjutnya menggambar diagram fasor dengan memilih fase arah datar sembarang. Jika kita pilih fase arah datar adalah $\omega t - \phi_0$ maka diagram fasor menjadi seperti pada Gambar 13.8.

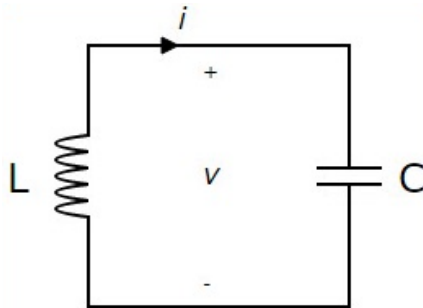


Gambar 13.8 Diagram fasor untuk fungsi $V = A \sin(\omega t - \phi_0)$

Rangkaian Lc Dan Rangkaian Rlc

Rangkaian LC

Rangkaian LC juga disebut rangkaian tangki, rangkaian tuned atau rangkaian resonan, LC adalah rangkaian listrik yang terdiri atas Induktor dan Kapasitor yang yang dihubungkan bersama. Rangkaian LC ini digunakan untuk menghasilkan sinyal pada frekuensi tertentu atau menerima sinyal dari sinyal yang lebih komposit pada frekuensi tertentu. Rangkaian LC adalah komponen elektronik dasar dalam berbagai perangkat elektronik, terutama dalam peralatan radio yang digunakan dalam rangkaian seperti tuner, filter, mixer frekuensi, dan Osilator. Fungsi utama dari rangkaian LC umumnya beresilasi dengan redaman minimum (Giancolli, 2008).



Gambar 13.9 Rangkaian LC

Rangkaian RLC

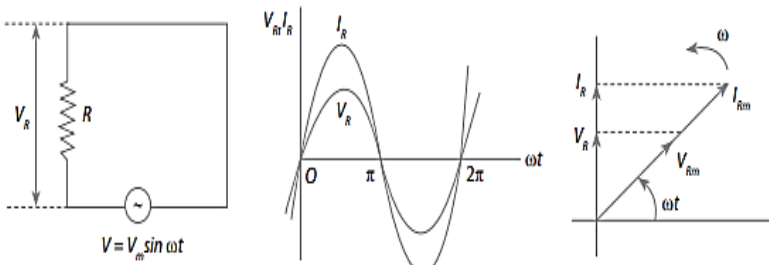
Rangkaian RLC adalah rangkaian yang tersusun atas resistor, induktor, dan kapasitor baik secara seri maupun paralel. Rangkaian RLC bisa membentuk osilator harmonik dan akan beresonansi pada rangkaian LC. Analisis rangkaian RLC dimulai dari kondisi arus saat masuk ke resistor, induktor, dan kapasitor.

1. Arus AC (arus bolak-balik) pada resistor

Arus AC sebesar I yang melewati resistor akan muncul tegangan seperti persamaan berikut.

$$V_R = I R$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa besarnya arus yang melalui resistor sebanding dengan tegangan yang dihasilkan. Artinya, jika arus yang masuk besar, tegangan yang dihasilkan juga akan besar. Keadaan itu dikatakan bahwa arus dan tegangannya sefase seperti grafik pada gambar 13.10 berikut.



Gambar 13.10 Arus AC pada resistor

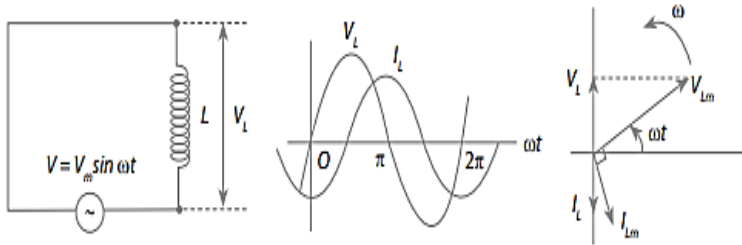
Gambar paling kiri merupakan contoh susunan resistor, gambar tengah merupakan grafik sinusoidal antara tegangan dan arus, dan gambar paling kanan merupakan diagram fasor antara tegangan dan arus. Pada gambar tengah terlihat bahwa tegangan dan arus bergerak dengan fase yang sama.

2. Arus AC (arus bolak-balik) pada induktor

Jika suatu induktor dilalui arus AC yang besarnya berubah setiap waktu, maka akan dihasilkan tegangan induksi V_L . Secara matematis, hubungan antara arus dan tegangan induksi dirumuskan sebagai berikut.

$$V_L = L \frac{dI}{dt}$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa semakin besar perubahan arus setiap waktu, semakin besar pula tegangan induksinya. Tegangan induksi akan muncul setelah ada perubahan arus pada selang waktu tertentu. Dari kondisi tersebut, bisa dikatakan bahwa jalannya arus tidak bersamaan dengan tegangan atau tegangan tidak sefase dengan arus. Tegangan akan mendahului arus dengan beda sudut fase 90° .



Gambar 13.11 Arus AC pada induktor

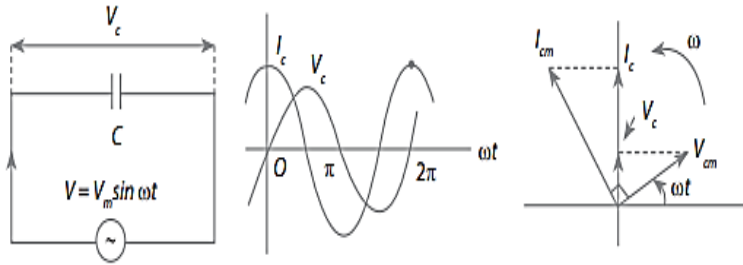
Gambar paling kiri merupakan contoh susunan induktor, gambar tengah merupakan grafik sinusoidal antara tegangan dan arus, serta gambar paling kanan merupakan diagram fasor antara tegangan dan arus. Pada gambar tengah terlihat bahwa tegangan mendahului arus dengan beda sudut fase 90° atau arus tertinggal tegangan sejauh 90° .

3. Arus AC (arus bolak-balik) pada kapasitor

Saat kapasitor dilalui Arus AC sebesar I_C , akan muncul tegangan V_C . Tegangan kapasitor tersebut akan naik menjadi V_t secara perlahan. Secara matematis, dirumuskan sebagai berikut.

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_c dt$$

Saat kapasitor dilalui arus, tegangan kapasitor akan naik. Sebaliknya, saat arus diturunkan sampai ke titik nol, tegangan kapasitor akan turun secara perlahan. Keadaan ini menunjukkan bahwa arus dan tegangan tidak berjalan secara bersamaan. Artinya, arus dan tegangan tidak sefase. Arus akan mendahului tegangan dengan beda sudut fase 90° .

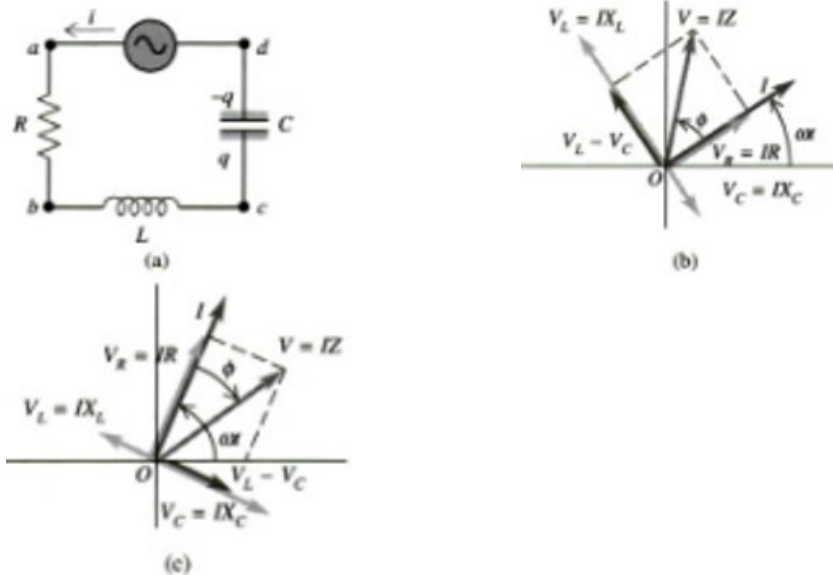


Gambar 13.12 Arus AC pada kapasitor

Gambar paling kiri merupakan contoh susunan kapasitor, gambar tengah merupakan grafik sinusoidal antara tegangan dan arus, serta gambar paling kanan merupakan diagram fasor antara tegangan dan arus. Pada gambar tengah terlihat bahwa arus mendahului tegangan dengan beda sudut fase 90° atau tegangan tertinggal arus sejauh 90° .

Rangkaian Rlc Seri

Pada rangkaian ini, resistor, induktor, dan kapasitor dirangkai secara seri seperti gambar 13.13 berikut.



Gambar 13.13 (a) Rangkaian RLC seri dengan sumber AC (b) Diagram fasor jika $X_L > X_C$ (c) Diagram fasor jika $X_C > X_L$ (Sumber: Sears & Zemansky, 2004)

Secara matematis, persamaan yang terkait rangkaian RLC seri ini dirumuskan sebagai berikut.

- Tegangan efektif

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$$

- Impedansi

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

- Besarnya sudut fase rangkaian

$$\tan \theta = \frac{X_L - X_C}{R}$$

- Arus efektif

$$I = \frac{V_t}{Z}$$

- Frekuensi resonansi RL

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Dari pembahasan dan persamaan-persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa rangkaian RLC seri memiliki beberapa sifat yaitu:

1. Jika $X_L > X_C$, rangkaian bersifat induktif di mana arus tertinggal oleh tegangan dengan beda sudut fase -90° .
2. Jika $X_L < X_C$, rangkaian bersifat kapasitif di mana arus mendahului tegangan dengan beda sudut fase 90° .
3. Jika $X_L = X_C$, rangkaian bersifat resistif di mana arus tertinggal oleh tegangan dengan beda sudut fase 0 .

Daya Pada Rangkaian Listrik Bolak Balik

Besarnya daya pada rangkaian arus bolak-balik antara teori dengan hasil sesungguhnya dari hasil pembacaan alat ukur tidaklah sama, hal ini disebabkan adanya hambatan semu yang berasal dari induktor (X_L) dan kapasitor (X_C) yang disebut reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Daya sesungguhnya yang timbul pada rangkaian arus listrik hanyalah pada hambatan murni saja (R). Perbandingan antara daya

sesungguhnya (P_{ss}) dan daya semu yang menurun (P_{sm}) disebut **faktor daya** yang dinyatakan dalam persamaan:

$$\cos \theta = \frac{P_{ss}}{P_{sm}}$$

dimana:

$$P_{ss} = I^2 R \text{ (daya sesungguhnya) dan}$$

$$P_{sm} = I^2 Z \text{ (daya semu)}$$

Sehingga:

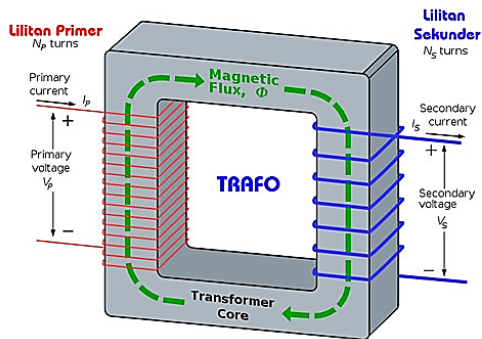
$$\cos \theta = \frac{I^2 R}{I^2 Z} = \frac{R}{Z}$$

Jadi daya sesungguhnya dalam rangkaian arus AC dapat dinyatakan sama dengan hasil perkalian daya hasil perhitungan teoritis dengan faktor daya yang secara umum dapat dituliskan:

$$P = VI \cos \theta$$

Transformator

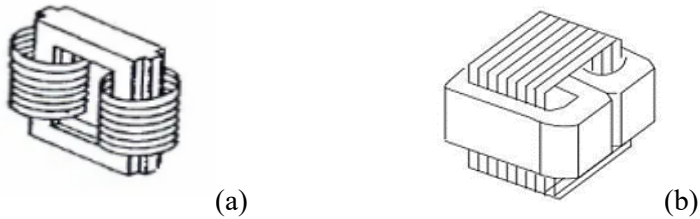
Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi elektromagnet. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi Faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik, maka akan mengalir arus dalam kumparan primer menimbulkan perubahan fluks magnetik dalam inti besi (Fery, B & Firdianto, 2016).



Gambar 13.14 Skematik dasar trafo
(Sumber: <https://artema.co.id/pengertian-transformator/>)

Pada prinsipnya konstruksi transformator dibedakan menjadi dua jenis yaitu sebagai berikut:

1. Konstruksi jenis inti (core), lilitan primer membelit salah satu kaki transformator dan lilitan sekunder membelit kaki transformator yang lain.
2. Konstruksi jenis cangkang (shell), lilitan primer dan lilitan sekunder membelit kaki yang sama (kaki tengah) pada transformator.



Gambar 13.15 (a) Konstruksi transformator tipe inti (b) Konstruksi transformator tipe cangkang (Sumber: Zuhal, 1991)

Prinsip kerja sebuah trafo berkaitan sangat sederhana. Tegangan AC diberikan pada kumparan primer, sehingga dihasilkan fluks sinusoidal f dengan frekuensi sama dengan frekuensi tegangan AC yang membangkitkannya. Fluks magnetik yang berfluktuasi di inti trafo ini menginduksikan tegangan pada kumparan sekunder yang besarnya mengikuti hukum induksi magnetik Faraday, yaitu:

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

Dimana N adalah jumlah lilitan pada kumparan sekunder dan $d\phi/dt$ adalah perubahan fluks magnetik terhadap waktu (dalam satuan Wb/s).

Hubungan antara tegangan V , arus I dan banyak lilitan N adalah:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

Jenis-jenis transformator yang sering digunakan antara lain:

- Step-up (mengubah dari tegangan rendah ke tinggi)
- Step-down (mengubah dari tegangan tinggi ke rendah)

Nilai efisiensi transformator adalah sebagai berikut: $\frac{\text{Daya Sekunder}}{\text{Daya Primer}} =$

$$\frac{P_S}{P_P} \times 100\%$$

Daftar Pustaka

- Edminister, J. (1997). *Electric Circuits Schaum Outline Series*. New York: Mc Graw Hill Book Company
- Fery, B & Firdianto. (2016). Analisa Minyak Transformator Pada Transformator Tiga Fasa Di PT X. *Jurnal Teknologi Elektro*, 7(2). Yogyakarta: Universitas Mercu Buana
- Giancolli, D.C. (2008). *Fisika Jilid 2*. Jakarta: Erlangga
- Jones, L. D. (1983). *Electronic Instruments & Measurements*. Newyork: John & Wiley Sons Inc.
- Sears & Zemansky. (2004). *University Physics 10th ed*. Massachussets: Addison Wesley Publishing Company
- Zuhal. (1991). *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: ITB
- <https://artema.co.id/pengertian-transformator/>

Profil Penulis



Mawarni Saputri, M.Pd

Ketertarikan penulis terhadap ilmu fisika dan pendidikan dimulai pada tahun 2008 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Langsa dengan memilih Jurusan IPA dan juga mengikuti olimpiade fisika, hingga lulus pada tahun 2011.

Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di prodi Pendidikan Fisika Bilingual Universitas Negeri Medan pada tahun 2015. Setahun kemudian, penulis melanjutkan studi S2 di prodi pendidikan Fisika Universitas Negeri Medan hingga selesai di tahun 2019.

Penulis memiliki kepakaran dibidang Pendidikan Fisika, IPA dan Pembelajaran. Dan untuk mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis pun aktif sebagai peneliti dibidang kepakarannya tersebut. Selain peneliti, penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif untuk memajukan pendidikan di Indonesia.

Email Penulis: mawarni_saputri@usk.ac.id

PERSAMAAN MAXWELL DAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

A. Jusriana

Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

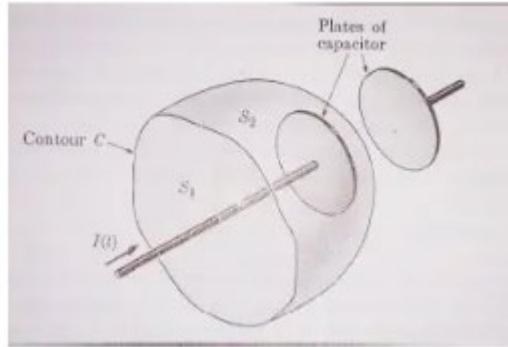
Arus Pergeseran Maxwell

Salah satu yang menjadi dasar dari teori elektromagnetik Maxwell adalah apa yang disebut dengan arus pergeseran. Persamaan arus pergeseran merupakan bentuk umum dari persamaan hukum Ampere atau koreksi dari ketidak konsistenan hukum Ampere. Maxwell menambahkan koreksi berdasarkan Hukum induksi Maxwell bahwa perubahan medan listrik juga menghasilkan medan magnet.

Dasar dari teori elektromagnetik Maxwell adalah apa yang disebut sebagai displacement current atau arus pergeseran. Hal ini tampaknya sering diabaikan, ini merupakan sebuah penyempurnaan penting teori. Dan hal ini memiliki peranan yang penting dalam topik-topik yang lain seperti gelombang, optik, relativitas, yang menjadikannya dasar beberapa buku. Kita ketahui bahwa medan magnetik disebabkan oleh adanya distribusi arus yang dipenuhi oleh hukum Ampere,

$$\oint H \cdot dl = \int J \cdot n da \quad (14.1)$$

sekarang kita akan memeriksa hukum ini, dan menunjukkan bahwa ini terkadang keliru, dan menemukan bentuk umum yang selalu benar.



Gambar 14.1 Kontur C dan dua permukaan, S_1 dan S_2 , untuk menguji hukum Ampere

(Reitz, Milford and Christy, 2009)

Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan himpunan dari empat persamaan diferensial parsial mengenai listrik dan magnet. Keempat persamaan ini adalah Hukum Gauss, Hukum Gauss untuk magnetisme, Hukum Faraday, dan Hukum Ampere. Untuk ruang tak hampa, maka diperlukan sedikit koreksi Maxwell pada persamaan Hukum Ampere yang disebut sebagai arus pergeseran.

Hukum Gauss mengenai listrik

Hukum Gauss mengenai listrik berbunyi “fluks listrik total yang menembus suatu permukaan tertutup sebanding dengan muatan listrik yang dilingkupi permukaan tersebut”

$$\oint \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (14.2)$$

Hukum Faraday

Hukum Induksi Faraday menyatakan perubahan medan magnet akan menghasilkan medan listrik (Guru and Hiziroglu, 2009)

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_b}{dt} \quad (14.3)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi_b}{dt} \quad (14.4)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (14.5)$$

Hukum Ampere

Hukum Ampere digunakan untuk menentukan induksi magnet untuk distribusi muatan listrik yang bersimetri tinggi. Hukum Amperedinyatakan sebagai berikut:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (14.6)$$

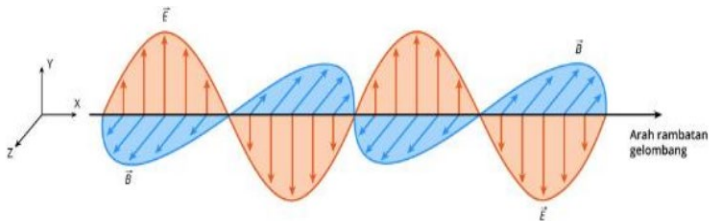
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \int \mathbf{J} dA \quad (14.7)$$

(Halliday, Resnick and Walker, 2017)

Persamaan Gelombang Untuk Elektromagnetik

1. Konsep Radiasi Elektromagnetik dan Pembentukannya

Merurut (Sukarno, no date) Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dapat merambat tanpa membutuhkan medium. Gelombang elektromagnetik dapat merambat di ruang hampa. Sementara itu, radiasi elektromagnetik merupakan kombinasi medan listrik E dan medan magnet B yang berosilasi dan merambat lewat ruang dan membawa energi dari satu tempat ke tempat yang lain. Cahaya tampak adalah salah satu bentuk radiasi elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik terdiri atas medan listrik dan medan magnet yang merambat saling tegak lurus.



Gambar 14.2: Gelombang elektromagnetik yang terbentuk dari medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus

Kecepatan gelombang elektromagnetik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$c = \frac{E}{B}$$

Keterangan

c = kelajuan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa (3×10^8 m/s)

E = kuat medan listrik (N/C)

B = Kuat medan magnetik (Tesla)

2. Spektrum Elektromagnetik merupakan Gelombang elektromagnetik pertama kali dibangkitkan dan dideteksi secara eksperimen oleh Heinrich Hertz pada tahun 1887. Hertz menggunakan peralatan yang memancarkan muatan. Muatan tersebut dibuat bergerak bolak balik dalam waktu yang sangat singkat.

Gelombang Bidang dan Kecepatan Cahaya

1. Gelombang Bidang

Gelombang bidang atau gelombang datar (*planet wave*) adalah gelombang yang apabila bidang tegak lurus dengan arah perambatannya, maka titik-titik potong gelombang tersebut pada bidang yang tegak lurus itu memiliki sudut fase yang sama. Gelombang bidang memiliki sifat perambatan yang berbeda untuk medium penghantar gelombang yang berbeda. Medium penghantar gelombang bidang dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu:

- a. medium dielektrik sempurna, dan
- b. medium konduktor atau medium dielektrik merugi

Kedua medium ini memiliki nilai factor atenuasi yang berbeda, untuk medium dielektrik faktor atenuasi gelombang hamper mendekati 1, sedangkan untuk gelombang yang merambat di medium dielektrik merugi factor atenuasi ($e^{\alpha x}$) cukup besar. Sehingga gelombang bidang yang merambat di medium dielektrik merugi atau konduktornya akan mengalami redaman yang hebat, sehingga muncul istilah kedalaman penetrasi (*Medan Elektromagnetika Terapan*, no date).

2. Kecepatan Cahaya

Kecepatan cahaya adalah kecepatan rata-rata dari gelombang cahaya ketika berjalan. Kecepatan cahaya telah sering di ukur oleh ahli fisika. Sejak pengukuran pertama yang dilakukan oleh Fizeau, kecepatan cahaya telah diukur secara berulang-ulang dengan peningkatan akurasi yang tinggi. Kecepatan cahaya di ruang vakum adalah $c = 3.10^8$ m/s. Symbol c selalu digunakan untuk kecepatan cahaya di ruang vakum. Pengukuran awal yang paling baik dilakukan oleh Olaus Roomer seorang ahli fisika dari Denmark pada tahun 1676.

Kecepatan cahaya di dalam bahan transparan lebih rendah daripada kecepatan cahaya di ruang vakum. Rasio antara kecepatannya cahaya di bahan vakum dengan kecepatan cahaya di bahan transparan di sebut indeks bias (Shafhira *et al.*, 2021)

Gelombang Sinusoidal

Gelombang sinusoidal yang murni pada jaringan sistem tenaga didapatkan ketika tidak adanya distorsi pada gelombang. Distorsi gelombang tegangan atau arus pada praktik dilapangannya sering ditemukan dan membuat gelombang AC tidak memiliki bentuk yang murni. Ada lima jenis utama distorsi bentuk gelombang yang ditemukan diantaranya adalah DC offset, harmonisa, interharmonik, notching, dan derau listrik (Fuchs and Masoum, 2008).

Menurut (Sirait, 2020), kita bisa menetapkan kecepatan transversal sembarang partikel yang bergerak pada gelombang transversal dengan menggunakan fungsi gelombang. Ada perbedaan antara cepat rambat gelombang dengan kecepatan transversal. Agar dapat membedakan keduanya, cepat rambat gelombang diberi simbol v , sedangkan kecepatan transversal diberi simbol v_y . Untuk menetapkan kecepatan transversal v_y di titik tertentu, kita artikan sebagai parsial fungsi gelombang $y(x, t)$ dengan t . Jika fungsi gelombangnya berbentuk

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx),$$

maka kecepatan transversal didefinisikan sebagai

$$v_y(x, t) = \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \omega A \cos(\omega t - kx) \quad \dots (14.8)$$

Ungkapan $\partial y(x, t) / \partial t$ disebut diferensial parsial $y(x, t)$ dengan t , yaitu diferensial $y(x, t)$ dengan t mempertahankan x tetap. Persamaan (1) menunjukkan bahwa kecepatan transversal berubah dengan waktu. Kecepatan transversal mencapai maksimum ketika $\cos(\omega t - kx) = 1$, sehingga $v_{y, maks} = \omega A$.

Percepatan partikel dalam gelombang sinusoidal merupakan diferensial parsial kedua dari $y(x, t)$ dengan t . Jadi

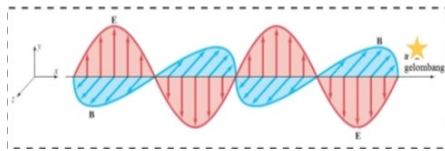
$$a_y(x, t) = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t - kx) = -\omega^2 y(x, t) \dots (14.9)$$

Gelombang Elektronik Melalui Materi

Gelombang Elektromagnetik yang dijumpai dalam kehidupan sehari-hari merupakan cahaya yang dihasilkan oleh matahari. Ketika cahaya itu melewati sebuah medium yang memiliki beda kerapatan seperti udara dan air, maka cahaya akan terdispersi membentuk warna-warni di langit yang saling berurutan. Beda kerapatan disebabkan oleh susunan partikel yang lebih renggang untuk medium udara, dan susunan partikel yang lebih pada untuk medium air (Nurul Mega Astutik, 2021).

Energi elektromagnetik dipancarkan atau dilepaskan oleh semua masa dalam semesta pada level yang berbeda-beda. Semakin tinggi level energi suatu sumber energi, semakin rendah panjang gelombang dari energi yang dihasilkan, dan semakin tinggi frekuensinya. Frekuensi tergantung dari kecepatan merambatnya gelombang (Agus Rahmad, et al, 2016).

Pada gelombang elektromagnetik terdapat muatan energi listrik dan magnetik dimana medan listrik (E) selalu tegak lurus terhadap medan magnet (B) yang keduanya menuju ke arah gelombang

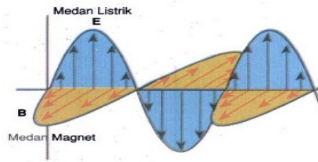


Gambar 14.3 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik meliputi cahaya, gelombang radio, sinar x, sinar gamma, mikro gelombang, dan lain-lain. Berbagai gelombang elektromagnetik hanya berbeda dalam panjang gelombang dan frekuensinya ('Modul Vi Gelombang Elektromagnetik', 2013)

Gelombang Elektromagnetik Tegak

Gelombang yang terjadi akibat interaksi antara medan magnet dan medan listrik ini disebut gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang medan, bukan gelombang mekanik (materi). Pada gelombang elektromagnetik, medan listrik E selalu tegak lurus arah medan magnetic B dan keduanya tegak lurus arah rambat gelombang.



Gambar 14.4 Medan listrik dan medan magnet pada gelombang elektromagnetik

Dari visualisasi gelombang elektromagnetik pada dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

Pertama, gelombang elektromagnetik merupakan perpaduan gelombang medan listrik dan medan magnet yang merambat. Arah getar kedua medan saling tegak lurus. Kedua, arah getar gelombang elektromagnetik tegak lurus terhadap arah perambatannya. Jadi, gelombang elektromagnetik termasuk gelombang transversal. Ketiga, gelombang elektromagnetik bergetar secara sinusoidal (Ruwanto, no date).

Berdasarkan Hukum Faraday, Medan Listrik dan medan magnet merupakan besaran vektor, maka dengan demikian energi gelombang elektromagnetik merupakan vektor yang artinya mempunyai besar dan arah.

Persamaan Maxwell:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi^{elec}}{dt} + \mu_0 i^{enc} \text{ (Ampere-Maxwell law)}$$

Berdasarkan persamaan maxwell maka perubahan medan listrik dan medan magnet merupakan fungsi waktu. Secara aljabar persamaan tersebut di atas sama dengan fungsi ajabar pada perambatan akibat perbedaan tekanan pada udara maupun pada gelombang yang terjadi dipermukaan air. Dari hal inilah konsep “Gelombang elektromagnetik lahir. Dalam gelombang elektromagnetik besarnya atau kerapatan energi pada medan listrik sama besarnya dengan yang terdapat pada medan magnet, disetiap titik sepanjang gelombang elektromagnetik tersebut.

Energi elektromagnetik dapat dibedakan berdasarkan panjang gelombang dan frekuensinya. Panjang gelombang (λ) = jarak lurus dari puncak gelombang yang satu dengan puncak gelombang lain yang terdekat. Satuan: Km, m, cm, mm, mikrometer (μm), nanometer (nm), angstrom (A), pikometer (pm). Frekuensi (f) = Jumlah siklus gelombang yang melalui satu titik dalam satu detik. Satuan Hertz (Hz),

Kilohertz (KHz), Megahertz (Mhz), Gigahertz (GHz), Terahertz (THz). Hubungan Panjang Gelombang, Frekuensi dan kecepatan rambat gelombang:

$$V = \lambda \cdot f$$

Gelombang Elektromagnetik mempunyai komponen yang terdiri dari gelombang elektrik (E) dan gelombang magnetik (B) yang saling tegak lurus dan masing-masing tegak lurus terhadap radiasi ('Modul Vi Gelombang Elektromagnetik', 2013).

Energi dan Momentum Gelombang Elektromagnetik

Pada 1922, Arthur Compton mengajukan hipotesis bahwa gelombang memiliki momentum yang berbanding terbalik dengan panjang gelombang:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

dan berperilaku sebagai partikel. Interaksi antara Foton dengan elektron adalah interaksi tumbukan yang memenuhi hukum kekekalan momentum-energi. Hasil eksperimen dapat dijelaskan dengan baik oleh Compton (Pramono, Albar and Yahya, no date).

Telah diketahui bahwa sifat dielektrik sangat penting untuk prediksi secara teori. Energi disipasi gelombang mikro merepresentasikan energi absorpsi yang diubah dalam bentuk energi panas pada bahan dielektrik. Pada saat yang sama temperatur akan dihasilkan dengan perubahan sifat dielektrik. Untuk fluida minyak (oil-water emulsi) ekspresi efektif dielektrik menurut Fricke adalah =

$$\kappa^* = \kappa_C^* \frac{\kappa_D^* (1 + a\phi) + \kappa_C^* a(1 - \phi)}{\kappa_C^* (a + \phi) + \kappa_D^* (1 - \phi)}$$

adalah relatif konjugat sifat dielektrik pada fase kontinu dan disperse. Sementara ϕ adalah volume fraksi fase dispersi dan $a = 2$ untuk disperse bola dan $a=1$ untuk disperse silinder, serta o/w emulsi. Untuk fluida minyak (water-oil emulsi) ekspresi efektif dielektrik adalah

$$\ln \kappa^* = \phi \ln \kappa_D^* + (1 - \phi) \ln \kappa_C^*$$

(Yustiana, Muntini and Pramono, 2014).

Gelombang Elektromagnetik adalah gelombang yang dapat merambat walau tidak ada medium. Energi elektromagnetik merambat dalam gelombang dengan beberapa karakter yang bisa diukur, yaitu: panjang

gelombang/wavelength, frekuensi, amplitude dan kecepatan. Radiasi adalah semua jenis energi yang dihantarkan tanpa medium perantara. Energi radiasi tersebut umumnya berupa gelombang, biasanya berupa gelombang sinusoidal. Pada televisi, radio dan ponsel terdapat transmitter yang mengubah suara menjadi gelombang sinusoidal kontinu, yang kemudian dipancarkan keluar melalui antena dan berfluktuasi melalui udara. Gelombang-gelombang inilah yang menimbulkan radiasi elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik dapat bersifat seperti gelombang atau partikel. Ketika ada tegangan dan arus listrik dialirkan melalui jaringan transmisi, distribusi dan digunakan dalam berbagai peralatan elektronik, saat itu juga muncul medan elektromagnetik di sekitar saluran dan peralatan listrik tersebut.

Jika Operator Koefisien Fourier dimasukkan kembali ke persamaan Hamiltonian radiasi klasik persamaan dengan memperhatikan sifat tidak komutnya perkalian koordinat posisi dan momentum maka akan diperoleh Hamiltonian osilator harmonik kuantum

$$H = \sum_{\nu} \hbar \omega_{\nu} \left(N + \frac{1}{2} \right)$$

Dengan demikian telah diperoleh tetapan Planck. Perlu diperhatikan bahwa dalam langkah menentukan Operator Koefisien Fourier digunakan persamaan kanonik yang merupakan persamaan yang biasanya digunakan hanya dalam kasus gerak partikel. Hal ini mempertegas sifat partikel dari cahaya (Faidullah, Sasongko and Priyono, no date).

Radiasi Elektromagnetik

Radiasi elektromagnetik merupakan kombinasi medan listrik dengan medan magnet yang berosilasi dan merambat melewati ruang serta membawa energi dari satu tempat ke tempat yang lain. Gelombang elektromagnetik ditemukan oleh Heinrich Hertz. Gelombang elektromagnetik termasuk gelombang transversal. Setiap muatan listrik yang memiliki percepatan memancarkan radiasi elektromagnetik. Ketika kawat menghantarkan arus bolak-balik, radiasi elektromagnetik dirambatkan pada frekuensi yang sama dengan arus listrik. Gelombang elektromagnetik dapat bersifat seperti gelombang atau seperti partikel. Sebagai gelombang, dicirikan dengan kecepatan cahaya, panjang gelombang, dan frekuensi. Jika dipertimbangkan sebagai sebuah partikel maka dikenal dengan sebutan foton, dimana masing-masing mempunyai energi yang berhubungan dengan frekuensi gelombang ditunjukkan oleh hubungan:

$$E_{\text{photon}} = hf$$

Dimana:

E: energi foton

H: konstanta Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

f: frekuensi gelombang

Tabel 14.5 Gelombang elektromagnetik

Gelombang	Panjang gelombang λ
Gelombang Radio	1 mm-10.000 km
Infra Merah	0,001–1 mm
Spektrum Kasatmata	400-720 nm
Ultra Violet	10-400 nm
Sinar X	0,01-10 nm
Sinar Gamma	0,0001-0,1 nm

(Richard Feynman, Robert B. Leighton and Matthew Sands, 2005)

Daftar Pustaka

- Astutik, N. M. (2021). Analisis Kemampuan Multirepresentasi Verbal dan Grafik Mahasiswa Fisika pada Konsep Spektrum Gelombang Elektromagnetik. *Junal Phi (Jurnal Pendidikan Fisika dan Fisika Terapan) Universitas Jember, Indonesia* 2(2), 22-26.
- Faidullah, I.Z., Sasongko, D.P. and Priyono, P. (no date) 'Kajian Teoritis Penentuan Tetapan Planck Menggunakan Model Elektrodinamika Maxwell', *BERKALA FISIKA*, 12(4), pp. 131–136.
- Fuchs, E.F. and Masoum, M.A.S. (2008) 'Torques in induction machines due to low-frequency voltage/current harmonics', *International journal of power & energy systems*, 28(2), p. 212.
- Guru, B.S. and Hizirolu, H.R. (2009) *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*. Cambridge University Press.
- Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. (2017) *Fundamentals of Physics, Volume 1*. John Wiley & Sons.
- 'Modul Vi Gelombang Elektromagnetik' (2013), pp. 188–207.
- Pramono, M.E., Albar, K. and Yahya, E. (no date) 'Konstanta Planck'.
- Reitz, J.R., Milford, F.J. and Christy, R.W. (2009) *Foundations of Electromagnetic Theory*. Pearson/Addison-Wesley.
- Richard Feynman, Robert B. Leighton and Matthew Sands (2005) 'Mainly mechanics, radiation, and heat', in *The Feynman Lectures on Physics*. Available at: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_toc.html (Accessed: 1 June 2023).
- Ruwanto, B. (no date) *Asas-Asas Fisika 1B*. Yudhistira Ghalia Indonesia.
- Sirait, R. (2020) 'Fisika Gelombang'. *Medan Elektromagnetika Terapan* (no date). Erlangga. Available at: <https://books.google.co.id/books?id=6E06Dl4wc6UC>.
- Shafhira, M. *et al.* (2021) *Fisika Optik Umum dan Mata*. Media Sains Indonesia. Available at: <https://books.google.co.id/books?id=KNExEAAAQBAJ>.
- Sukarno, B.B. (no date) 'RADIASI ELEKTROMAGNETIK FISIKA

XII'.

Yustiana, Y., Muntini, M.S. and Pramono, Y.H. (2014) 'Penentuan Kelayakan Fungsi untuk Pemodelan Pemanasan Minyak Mentah menggunakan Energi Gelombang Mikro', *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 10(3), pp. 117–122.

Profil Penulis



A. Jusriana ,S.Si, M.Pd

Penulis lahir di Lanca tahun 1988. Tahun 2006 lulus dari SMA Negeri Tellu Siattinge, dan tahun 2010 lulus dari S1 Fisika UNM. Pada Tahun 2010 melanjutkan kuliah S2 pada Program Pasca Sarjana UNM Prodi S2 Pendidikan Fisika. Pada tahun yang sama yakni tahun 2010-2015 mengajar di SMA Frater Makassar, tahun 2013 mengajar di kampus Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar pada Fakultas Tarbiyah dan Keguruan Prodi Pendidikan Fisika sampai sekarang.

Selama mengajar di Prodi Pendidikan Fisika, ia telah mengajarkan berbagai mata kuliah di antaranya mata kuliah Fisika Dasar 1, Fisika Dasar 2, Fisika Modern, Termodinamika, Manajemen Laboratorium, Fisika Sekolah 1, Fisika Sekolah 2, Gelombang dan Optik, Fisika Inti, serta Pendahuluan Zat Padat.

Alamat email penulis : andi.jusriana@uin-alauddin.ac.id

Irnin Agustina Dwi Astuti
Universitas Indraprasta PGRI

Pengertian Cahaya

Cahaya adalah bentuk energi elektromagnetik yang dapat dilihat oleh mata manusia. Cahaya terdiri dari berbagai panjang gelombang yang membentang dari spektrum elektromagnetik, mulai dari panjang gelombang yang lebih pendek seperti sinar gamma dan sinar-X, hingga panjang gelombang yang lebih panjang seperti sinar inframerah dan gelombang radio.

Sejarah penelitian tentang cahaya dimulai sejak zaman kuno. Para ilmuwan dan filosof di masa lampau telah mengajukan berbagai teori tentang cahaya dan bagaimana ia bergerak. Salah satu pandangan yang umum adalah teori emisif, yang menganggap bahwa cahaya berasal dari mata manusia dan kemudian memancar ke objek di sekitarnya.

Akan tetapi, pemahaman ilmiah tentang cahaya berkembang secara signifikan pada abad ke-17. Pada tahun 1666, fisikawan Sir Isaac Newton melakukan serangkaian eksperimen dengan menggunakan prisma untuk memecah cahaya matahari menjadi spektrum warna yang berbeda. Ia menemukan bahwa cahaya putih sebenarnya terdiri dari spektrum warna yang terpisah.

Pada abad ke-19, ilmuwan seperti Thomas Young dan Augustin-Jean Fresnel mengembangkan teori gelombang cahaya. Mereka mengusulkan bahwa cahaya adalah gelombang yang merambat melalui medium yang disebut eter. Teori ini dapat menjelaskan fenomena interferensi dan difraksi cahaya. Pada tahun 1801 Thomas Young melakukan suatu peragaan yang benar-benar jelas mengenai sifat gelombang Cahaya, untuk pertama kalinya. Young menunjukkan

bahwa dalam kondisi-kondisi yang tepat, sinar-sinar Cahaya saling berinterferensi. Perilaku yang demikian tidak dapat dijelaskan menggunakan teori partikel karena tidak mungkin dua partikel atau lebih dapat bergabung atau saling menghilangkan (Sutrisno, 1979).

Pemahaman tentang cahaya mengalami revolusi besar pada awal abad ke-20 dengan munculnya teori kuantum. Fisikawan Max Planck menyatakan bahwa cahaya sebenarnya terdiri dari partikel energi diskret yang disebut "kuanta" atau "foton". Teori ini membuka jalan bagi perkembangan mekanika kuantum dan memperoleh pemahaman yang lebih dalam tentang sifat cahaya.

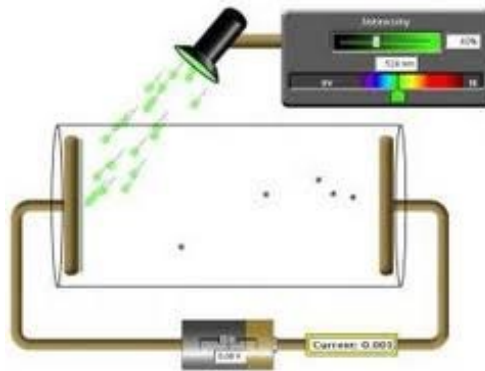
Pada abad ke-20, penemuan dan pengembangan teknologi seperti laser, optik kuantum, dan serat optik telah mengubah cara kita menggunakan dan memahami cahaya. Cahaya juga memiliki peran penting dalam bidang fotografi, komunikasi optik, penginderaan jauh, dan banyak aplikasi teknologi lainnya.

Gelombang cahaya terdiri dari medan listrik dan medan magnetik yang saling terkait dan saling tegak lurus satu sama lain serta tegak lurus terhadap arah propagasi gelombang. Gelombang cahaya memiliki beberapa karakteristik penting, termasuk panjang gelombang, frekuensi, dan amplitudo. Panjang gelombang (λ) adalah jarak antara dua puncak atau dua lembah berturut-turut dalam gelombang. Frekuensi (f) adalah jumlah siklus gelombang yang lewat dalam satu detik dan diukur dalam hertz (Hz). Terdapat hubungan matematis antara panjang gelombang dan frekuensi yaitu $c = \lambda f$, di mana c adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa (sekitar 299.792.458 meter per detik).

Selama hampir tiga abad para ilmuwan secara bertahap menyempurnakan dan memperbaiki teknik perhitungan itu. Sampai kini diketahui kecepatan cahaya dalam sekitar 1 bagian dari 100.000, Kecepatan Cahaya mencapai 300.000 km per detik (3×10^8 m/detik). Panjang gelombang ini berkisar antara 0,00004 cm sampai 0,000076 cm. Radiasi tipe tertentu seperti Cahaya ultraviolet dan inframerah adalah sama dengan cahaya yang dapat dilihat meskipun panjang gelombangnya lebih pendek atau lebih panjang dari pada panjang gelombang cahaya yang dapat dilihat itu. Pada akhirnya pengertian cahaya disini adalah mencakup semua panjang gelombang yang bertingkah laku serupa dengan cahaya yang merangsang penglihatan.

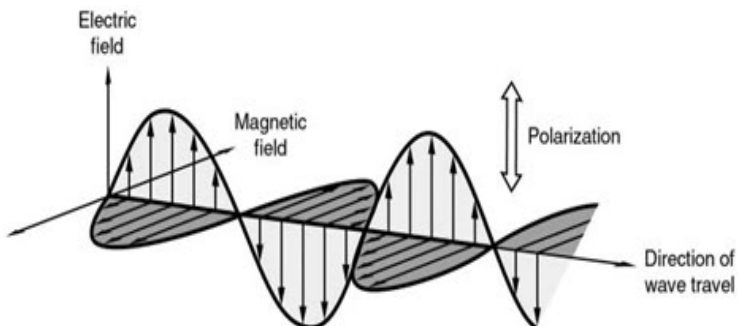
Teori gelombang elektromagnetik oleh Maxwell (*The electromagnetic wave theory of light*) menyatakan bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik. Dengan menggunakan 4 persamaan maxwell kita

dapat mencari kecepatan cahaya secara teori. Teori ini masih dipakai sampai hari ini. Akan tetapi setelah ditemukannya fenomena efek fotolistrik, teori bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik sedikit terusik (Halliday & Resnick, 1992). Karena teori cahaya ini tidak dapat menjelaskan fenomena efek foto listrik. Fenomena efek foto listrik hanya dapat dijelaskan dengan menganggap cahaya sebagai foton yaitu cahaya dianggap sebagai paket energi dengan massa diam nol. Hal ini akan dipelajari dalam fisika modern.



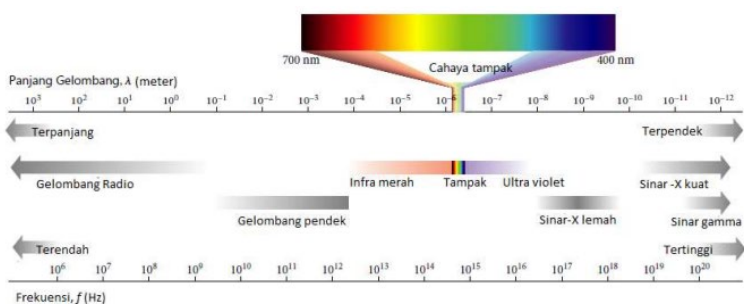
Gambar 15.1. Efek fotolistrik

Kejadian seperti difraksi dan interferensi merupakan bukti bahwa cahaya merupakan gelombang. Sedangkan efek fotolistrik dan gerak cahaya yang lurus merupakan bukti bahwa cahaya adalah partikel. Jadi dapat disimpulkan bahwa cahaya menunjukkan sifat sebagai gelombang dan dalam kondisi lain menunjukkan sifat sebagai partikel. Hal ini disebut dualisme cahaya.



Gambar 15.2. Gelombang elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik mempunyai daerah frekuensi yang sangat besar yaitu 10^1 sampai 10^{22} Hz. Gelombang elektromagnet timbul dari muatan listrik yang bergetar dipercepat. Didalam gelombang eletromagnetik, yang menjalar adalah medan listrik E dan medan magnet B . Medan E dan medan B mempunyai fasa yang sama, hanya arah kedua medan ini tegak lurus satu sama lain, dan kedua-duanya tegak lurus arah penjalaran seperti yang terlihat pada gambar 2.



Gambar 15.3. Spektrum gelombang elektromagnetik (Sumber: Bauer, 2011)

Gelombang elektromagnetik dengan panjang dan frekuensi dalam rentang tertentu diidentifikasi dengan nama karakteristik:

1. Cahaya tampak mengacu pada gelombang elektromagnetik yang dapat dilihat secara langsung dengan panjang gelombang dari 400 nm (ungu) sampai 700 nm (merah). Respon tertinggi mata manusia di sekitar 560 nm (kuning-hijau) dan menurun dengan cepat jauh dari panjang gelombang itu. Panjang gelombang lain dari gelombang elektromagnetik tidak dapat dilihat oleh mata manusia. Namun, dapat dideteksi dengan cara lain.
2. Gelombang inframerah (dengan panjang gelombang yang lebih besar dari cahaya tampak sekitar 10-4 m) dirasakan sebagai kehangatan. Detektor inframerah dapat digunakan untuk mengukur kebocoran panas di rumah dan kantor. Banyak hewan memiliki kemampuan untuk melihat gelombang inframerah, sehingga mereka dapat melihat dalam gelap. Inframerah dapat juga digunakan dalam kran otomatis di toilet umum dan remote control untuk TV dan DVD player.

3. Sinar ultraviolet memiliki panjang gelombang yang sangat pendek dari panjang gelombang cahaya tampak. Sinar ultraviolet dapat merusak kulit dan menyebabkan kulit terbakar. Untungnya, atmosfer bumi, terutama lapisan ozon yang mencegah sebagian besar sinar ultraviolet matahari mencapai permukaan bumi. Sinar ultraviolet digunakan di rumah sakit untuk mensterilkan peralatan dan juga menghasilkan sifat optik seperti fluoresensi.
4. Gelombang radio memiliki frekuensi mulai dari beberapa ratus kHz (radio AM) sampai 100 MHz (radio FM). Gelombang radio juga banyak digunakan dalam astronomi karena dapat melewati awan debu dan gas yang menghalangi cahaya tampak. Gelombang mikro digunakan untuk popcorn dalam oven microwave dan mengirim pesan telepon melalui menara atau satelit, memiliki frekuensi sekitar 10 GHz. Radar menggunakan gelombang dengan panjang gelombang antara gelombang radio dan gelombang mikro yang memungkinkan untuk melakukan perjalanan dengan mudah melalui atmosfer dan merefleksikan benda dari ukuran bola bisbol sampai ukuran awan badai.
5. Sinar-x digunakan untuk menghasilkan gambar medis, memiliki panjang gelombang dalam orde 10⁻¹⁰ m. Panjang ini hampir sama jarak antara dua atom dalam kristal padat, sehingga sinar-x digunakan untuk menentukan secara detail struktur molekuler bahan apapun yang dapat mengkristal.
6. Sinar gamma yang dipancarkan dalam peluruhan radio aktif memiliki panjang gelombang sangat pendek, dalam orde 10⁻¹² m, dan dapat menyebabkan kerusakan sel-sel manusia. Sinar gamma sering digunakan dalam medis untuk menghancurkan sel-sel kanker atau jaringan ganas lainnya yang sulit dijangkau.

Spektrum cahaya merujuk pada pembagian cahaya menjadi berbagai komponen dengan panjang gelombang yang berbeda. Ketika cahaya melewati prisma atau difraksi melalui kisi difraksi, cahaya dapat dipisahkan menjadi sejumlah warna yang berbeda. Setiap warna tersebut mewakili panjang gelombang yang berbeda di dalam spektrum elektromagnetik.

Spektrum cahaya terdiri dari spektrum kontinu dan spektrum diskrit. Spektrum kontinu terdiri dari semua panjang gelombang yang mungkin, seperti spektrum yang dihasilkan oleh cahaya putih. Spektrum diskrit terdiri dari serangkaian garis-garis terpisah pada panjang gelombang tertentu, seperti spektrum yang dihasilkan oleh

sumber cahaya yang mengeluarkan sinar terbatas pada panjang gelombang tertentu, seperti gas neon atau natrium.

Tabel 15.1. Nilai Panjang gelombang, frekuensi, dan energi pada Cahaya tampak

Warna	Panjang gelombang	Frekuensi	Energi
Ungu	380-450 nm	668-789 THz	2,75-3,26 eV
Biru	450-495 nm	606-668 THz	2,50-2,75 eV
Hijau	495-570 nm	526-606 THz	2,17-2,50 eV
Kuning	570-590 nm	508-526 THz	2,10-2,17 eV
Orange	590-620 nm	484-509 THz	2,00-2,10 eV
Merah	620-750 nm	400-484 THz	1,65-2,00 eV

Spektrum cahaya tampak, yang dapat dilihat oleh mata manusia, terdiri dari spektrum warna yang dikenal sebagai pelangi atau spektrum Newton. Spektrum ini mencakup warna-warna mulai dari merah, oranye, kuning, hijau, biru, nila, hingga ungu. Setiap warna dalam spektrum tampak memiliki panjang gelombang yang berbeda. Misalnya, merah memiliki panjang gelombang yang lebih panjang, sedangkan ungu memiliki panjang gelombang yang lebih pendek.

Selain spektrum cahaya tampak, terdapat spektrum elektromagnetik yang lebih luas. Spektrum elektromagnetik meliputi berbagai panjang gelombang mulai dari sinar gamma dan sinar-X dengan panjang gelombang yang sangat pendek hingga sinar inframerah dan gelombang radio dengan panjang gelombang yang lebih panjang. Setiap bagian dari spektrum elektromagnetik ini memiliki aplikasi dan sifat khusus dalam ilmu fisika dan teknologi.

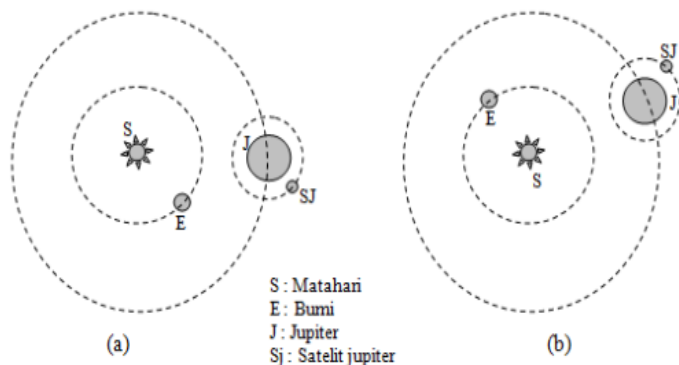
Pemahaman tentang spektrum cahaya telah membantu untuk mempelajari dan memahami berbagai aspek alam semesta, mulai dari komposisi bintang dan galaksi hingga interaksi materi dengan radiasi elektromagnetik. Spektrum cahaya juga digunakan dalam banyak aplikasi praktis, seperti spektroskopi, penginderaan jauh, komunikasi optik, dan teknologi optik lainnya.

Berbagai Perhitungan Untuk Kelajuan Cahaya

Cahaya merambat pada kelajuan yang sangat tinggi yaitu 3×10^8 m/s, sehingga upaya-upaya awal untuk menghitung kelajuannya mengalami kegagalan. Galileo berusaha mengukur kelajuan Cahaya dengan menempatkan dua pengamat pada Menara-menara yang terpisah sejauh kira-kira 10 km. Masing-masing pengamat membawa sebuah lentera dengan penutup. Seorang pengamat akan membuka lenteranya terlebih dahulu, kemudian pengamat yang lain akan membuka lenteranya pada saat ia melihat Cahaya dari lentera yang pertama. Galileo memperkirakan bahwa dengan mengetahui waktu singgah dari sinar Cahaya dari satu lentera ke lentera yang lain, kemudian ia memperoleh kelajuannya. Hasil percobaannya ini tidak memberikan kesimpulan apa-apa, sehingga kesimpulan Galileo tersebut bahwa tidak mungkin untuk menghitung kelajuan Cahaya dengan cara ini, karena waktu dingahnya sangat kecil dibandingkan waktu reaksi para pengamat.

1. Metode roemer

Pada tahun 1675, astronom Denmark yang bernama Ole Roemer (1644-1710) membuat perkiraan pertama kali mengenai kelajuan Cahaya yang cukup berhasil. Teknik Roemer mencakup pengamatan-pengamatan astronomis dari salah satu satelit Jupiter, yang memiliki periode revolusi mengelilingi Jupiter kira-kira 42,5 jam (Serway & Jewett, 2009). Periode perputaran Jupiter mengelilingi Matahari adalah 12 tahun, maka sewaktu Bumi berputar sejauh 90° mengelilingi Matahari, Jupiter berputar hanya $7,5^\circ$ ($1/12 * 90$).



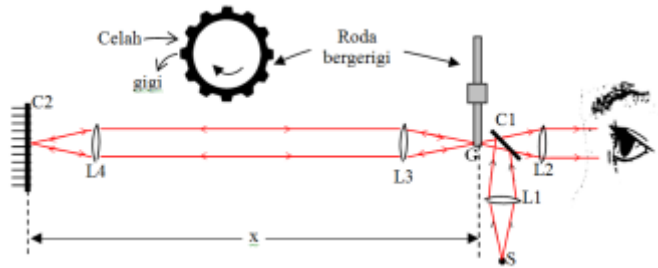
Gambar 15.4. Posisi bumi, Jupiter dan satelitnya

Gambar 1. (a) bumi dan Jupiter terletak pada sisi yang sama terhadap matahari, pada saat ini letak satelit Jupiter berdekatan

dengan bumi. Ketika bumi dan jupiter berada pada sisi yang sama di sebelah matahari, jaraknya lebih dekat dibanding jika kedua planet berada pada sisi yang berlawanan dari matahari. Pada gambar (b) setelah 6 bulan, bumi dan Jupiter terletak pada sisi yang berseberangan terhadap matahari, pada saat ini letak satelit Jupiter berjauhan dengan bumi. Garis putus-putus merupakan orbit planet dan satelitnya. Roemer mendapatkan selisih jarak pada dua posisi tersebut adalah 300.000.000 kilometer. Roemer menemukan nilai kecepatan cahaya dengan membagi jarak (300.000.000 km) dengan waktu (1000 detik) dan menghasilkan nilai kecepatan 300.000 kilometer per detik.

2. Metode Fizeau

Pada tahun 1849, seorang fisikawan Perancis Louise Fizeau, mencoba menghitung kecepatan cahaya dengan alat seperti yang diperlihatkan gambar



Gambar 15.5. Metode Fizeau

Cahaya dari sumber S akan dikumpulkan oleh lensa L1 ke cermin C1 yang dapat memantulkan dan meneruskan sebagian sinar dari sumber S. Sinar yang dipantulkan cermin C1 akan disejajarkan oleh lensa L3 kemudian sinar ini akan dikumpulkan oleh lensa L4. Sinar dari L4 akan dipantulkan oleh cermin C2 melalui lintasan yang sama yang dilalui ketika sinar menuju C2. Sinar dari C2 akan melalui L4, L3, C1, L2, kemudian baru dapat diamati oleh pengamat. Diantara C1 dan L3 terdapat roda gigi G yang berputar sangat cepat. Celah diantara gigi dapat meloloskan sinar dari C1 ke L3 dan sebaliknya. Sedangkan gigi roda dapat menghalangi sinar dari C1 ke L3 dan sebaliknya. Sinar tidak akan terlihat jika mengenai gigi, dan jika sinar melewati celah diantara gigi, sinar akan terlihat. Sebelum sinar dapat teramati, sinar harus dapat melakukan perjalanan bolak balik dari G-C2-G, sejauh $2x$.

Waktu yang diperlukan sinar untuk perjalanan bolak balik ini adalah:

$$t = \frac{2x}{c}$$

Jika roda berputar dengan kecepatan yang tepat, mungkin pengamat tidak akan dapat melihat sumber cahaya S. Hal ini disebabkan waktu yang diperlukan sinar untuk perjalanan G-C2-G tepat sama dengan waktu yang diperlukan roda untuk berganti dari gigi menjadi celah menjadi gigi lagi ketika melewati titik G. Dengan kata lain, sinar tidak memiliki waktu yang cukup untuk perjalanan mencapai pengamat karena akan selalu terhalang oleh gigi.

Jika θ adalah jarak sudut antara kedua ujung sebuah celah, dan ω adalah kecepatan sudut roda, maka waktu yang diperlukan untuk berganti dari gigi ke gigi berikutnya adalah:

$$t = \frac{\theta}{\omega}$$

Jika kita dapat menentukan kecepatan sudut roda agar sinar tidak dapat terlihat lagi, maka waktu yang diperlukan sinar untuk perjalanan G-C2-G akan sama dengan waktu yang diperlukan roda untuk berganti dari gigi menjadi celah, atau sama dengan waktu ketika roda berputar sebesar θ . Maka kecepatan cahaya dapat diamati dengan rumus:

$$c = \frac{2\omega x}{\theta}$$

Dalam percobaannya Fizeau menggunakan roda yang terdiri dari 720 gigi dan menempatkan cermin C2 sejauh 8630 m dari titik G. Nilai ω yang diperolehnya adalah 12,6 putaran per detik. Dari 720 gigi, dapat diketahui bahwa sudut θ adalah 1/1440 putaran. Maka dengan memasukan nilai nilai ini ke dalam persamaan (3) akan diperoleh hasil $c = 313.000.000$ km/s.

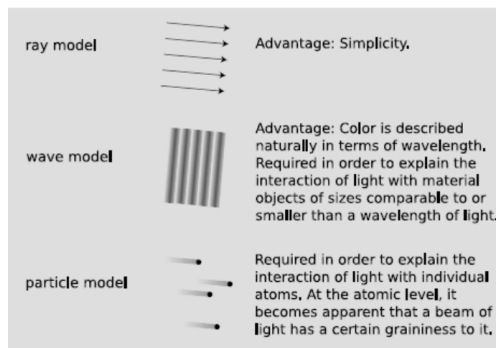
Tehnik yang digunakan Fizeau ini memiliki tingkat kesulitan yang tinggi, karena memerlukan panjang lintasan cahaya yang panjang. Tehnik yang serupa dikembangkan oleh Foucault. Modifikasi yang digunakan Foucault adalah mengganti roda gigi, yang digunakan oleh Fizeau, dengan cermin

Dengan alat ini cahaya tidak perlu menempuh perjalanan yang panjang sebelum dapat diukur. Disini cahaya hanya akan

dipantulkan oleh beberapa cermin yang posisinya telah diatur. Hal ini memungkinkan Foucault mengukur kecepatan cahaya dalam air. Dengan alatnya tersebut, Foucault menemukan bahwa kecepatan cahaya di air memiliki kecepatan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan kecepatan cahaya di udara. Foucault menemukan bahwa pergerakan cahaya berkaitan dengan mediumnya. Suatu hal yang telah diramalkan oleh teori cahaya sebagai gelombang.

Sifat-Sifat Cahaya

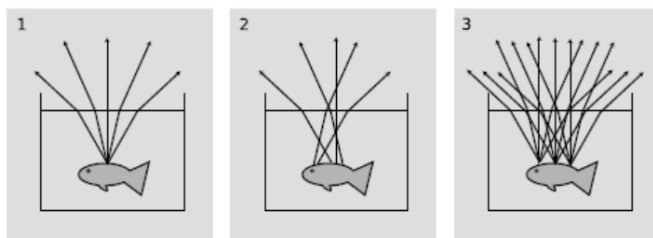
Konsep model Sinar cahaya dapat kita lihat melalui dengan melihat cahaya matahari yang menembus lubang di awan. Selanjutnya pada fisika modern cahaya lebih diperkenalkan sebagai suatu gelombang elektromagnetis. Pemahaman model sinar tidak hanya merupakan suatu gelombang elektromagnetik dan pemahaman lainnya mengatakan bahwa berkas sinar cahaya merupakan suatu yang lebih sederhana dibandingkan gelombang elektromagnetik. Seperti yang terlihat pada gambar 2 bahwa berkas cahaya dapat dibuat menjadi 3 (tiga) model (Hect, 1975).



Gambar 15.6. Model Berkas Sinar Cahaya

Pada umumnya Penggambaran cahaya menggunakan pendekatan Model Sinar. Pendekatan pemahaman cahaya dengan model ini sangatlah sederhana dan banyak digunakan untuk menjelaskan dalam ilmu optik meskipun terdapat juga menerjemahkan cahaya sebagai model gelombang. Di samping cahaya digambarkan sebagai berkas sinar dan model gelombang, maka cahaya juga digambarkan sebagai model partikel. Terhadap besaran ukuran Model gelombang diukur dengan menggunakan Panjang gelombang samapai mikrometer, sedangkan cahaya sebagai model partikel tentu ukurannya berupa atom yang memiliki satuan sampai nanometer.

Pemodelan cahaya sebagai berkas sinar akan sangat membantu menjelaskan perjalanan cahaya dalam satu sistem optik, sehingga prinsip – prinsip perjalanan sinar dapat diperhitungkan secara ilmiah tidak hanya sekedar hafalan-hafalan dalam menggambarkan perjalanan suatu sinar yang melalui atau melewati medium. Dan semua itu dapat dihitung secara kuantitatif.



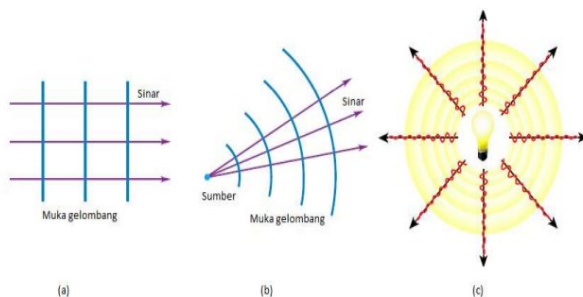
Gambar 15.7. Penggambaran cahaya dengan model sinar

Pada gambar 15.7 tersebut menjelaskan bahwa model sinar cahaya dari ikan kemudian mengalami pembelokan setelah melewati batas permukaan air. Dari gambar 7 terlihat bahwa:

- Jumlah sinar cahaya dari suatu obyek jumlahnya tidak terbatas.
- Dalam konsep dasar optik, sinar yang melewati medium akan terjadi pembiasan/pembelokan maupun dipantulkan.
- Perjalanan sinar cahaya dapat tidak terbatas, dan perjalanan sinar dari ikan tersebut secara acak keluar dari ikan menembus permukaan air tersebut (gambar paling kiri)
- Ketika terjadi pembauran sinar dari pantulan tempat yang berbeda menimbulkan persepsi yang salah bahwa sinar cahaya tersebut berasal dari satu titik.
- Kesulitan lain seperti yang ditunjukkan pada gambar 3 diatas yang paling kanan menunjukkan hamburan sinar cahaya dari beberapa tempat di tubuh ikan, sehingga ikan tersebut dapat dilihat dari beberapa tempat.

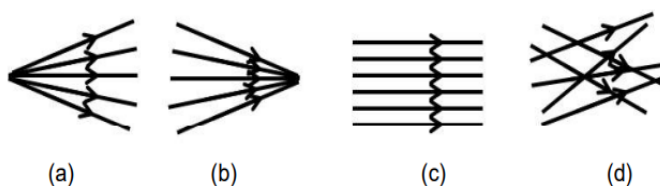
Sumber-sumber cahaya seperti matahari merupakan sumber Cahaya utama. Sumber cahaya lain seperti lampu pijar, lampu berpendar (neon), layar televisi, laser, dan LEDs (*light-emitting diodes*) semua ini menggunakan listrik untuk memproduksi cahaya. Untuk benda seperti bulan yang kelihatan bercahaya adalah benda yang memantulkan Cahaya dari matahari karena bulan tidak memiliki sumber cahaya sendiri.

Sebuah muka gelombang merupakan permukaan fasa yang konstan; muka gelombang bergerak dengan laju yang sama dengan laju perambatan gelombang itu. Sinar merambat menurut garis lurus sepanjang arah rambatan, yang tegak lurus terhadap muka gelombang seperti tampak pada Gambar 8.



Gambar 15.8 (a) Sinar dan muka gelombang datar, (b) sinar dan muka gelombang sferis, (c) sumber cahaya, muka gelombang dan sinar (Qadar, Haryanto, & Syam, 2019)

Jenis-jenis sinar dikenal ada empat yaitu: (a) sinar divergen atau menyebar, (b) sinar konvergen atau mengumpul, (c) sinar sejajar, dan (d) sinar difus.



Gambar 15.9. Jenis-jenis rambatan sinar (a) menyebar (divergen), (b) mengumpul (konvergen), (c) sejajar (paralel), dan (d) baur (difus)

Cahaya memegang peranan penting dalam proses penerimaan informasi melalui organ mata, yakni melihat. Setiap benda yang ada di sekeliling kita dapat dilihat oleh mata karena adanya cahaya. Cahaya itu sendiri dihasilkan dari suatu sumber cahaya. Setidaknya terdapat dua jenis sumber cahaya yang kita kenal yaitu sumber cahaya alami, seperti matahari dan bintangbintang; dan sumber cahaya buatan, seperti lampu senter, lilin, dan sejenisnya.

Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik transversal dengan panjang gelombang antara 400 nm hingga 600 nm. Karena merupakan gelombang elektromagnetik, cahaya tidak memerlukan medium sebagai media perambatannya. Artinya, walaupun tidak ada medium, gelombang cahaya dapat merambat dari suatu sumber cahaya ke penerima gelombang cahaya. Misalnya, meskipun kita ketahui bahwa di ruang angkasa itu tidak ada udara (hampa udara), Cahaya atau gelombang cahaya, yakni cahaya matahari dapat sampai hingga ke bumi.

Sifat-sifat dari cahaya diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Cahaya adalah gelombang elektromagnetik. Cahaya merupakan salah satu bentuk gelombang elektromagnetik yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang saling terkait. Gelombang elektromagnetik ini merambat melalui ruang hampa dengan kecepatan konstan yang dikenal sebagai kecepatan cahaya, yaitu sekitar 299.792.458 meter per detik dalam ruang hampa.
2. Cahaya merambat dalam garis lurus. Dalam kondisi di mana tidak ada penghalang atau medium yang mempengaruhi perambatannya, cahaya akan merambat dalam garis lurus. Namun, jika cahaya melewati medium dengan indeks bias yang berbeda atau mengalami interaksi dengan penghalang, seperti lensa atau cermin, perambatan cahaya dapat mengalami pembiasan, refleksi, atau difraksi.
3. Cahaya memiliki sifat interferensi dan difraksi. Interferensi adalah fenomena yang terjadi ketika dua atau lebih gelombang cahaya bertemu dan saling mempengaruhi. Interferensi dapat menghasilkan pola-pola cahaya yang saling memperkuat atau memadamkan. Difraksi adalah fenomena pembelokan cahaya ketika melalui sebuah celah atau melingkupi sebuah penghalang. Interferensi dan difraksi adalah contoh-contoh penting dari sifat gelombang cahaya.
4. Cahaya mengalami pemantulan dan pembiasan. Cahaya dapat memantul ketika mengenai permukaan yang berbeda indeks biasnya. Hukum refleksi menyatakan bahwa sudut datang sama dengan sudut pantul terhadap permukaan yang halus. Pembiasan terjadi ketika cahaya melewati batas antara dua medium dengan indeks bias yang berbeda, seperti ketika cahaya melewati air ke udara atau sebaliknya. Pada pembiasan, cahaya mengubah arahnya sesuai dengan hukum Snellius.

5. Cahaya dapat dipolarisasi. Polarisasi adalah sifat cahaya yang mengacu pada orientasi medan listriknya. Cahaya biasanya memiliki polarisasi yang tidak terdefinisi secara khusus, sehingga medan listriknya bergetar di semua arah tegak lurus terhadap arah perambatan. Namun, dengan menggunakan polaroid atau bahan-bahan tertentu, cahaya dapat dipisahkan menjadi komponen polarisasi yang khusus.
6. Cahaya memiliki sifat partikel. Selain sifat gelombang, cahaya juga dapat dianggap sebagai partikel-partikel kecil yang disebut foton. Foton memiliki energi yang berhubungan dengan frekuensi cahaya dan dapat berinteraksi dengan materi, seperti dalam efek fotoelektrik, di mana foton dapat menyebabkan pelepasan elektron dari permukaan logam.

Daftar Pustaka

- Bauer, W. and Westfall, G.D. (2011). *University Physics With Modern Physics*. 1 st Ed. New York. USA: Mc Graw Hill.
- Halliday, D., & Resnick, R. (1992). *Fisika Jilid 2 (Terjemahan)*. Jakarta: Erlangga.
- Hect, E. (1975). *Schaum's Outline Series Theory and Problems of Optics*. USA: McGraw-Hill.
- Qadar, R., Haryanto, Z., & Syam, M. (2019). *Optika*. Samarinda: Mulawarman University Press.
- Serway, R.A., & Jewett, J. W. (2009). *Fisika Untuk Sains dan Teknik (terjemahan)* Buku 3. Jakarta: Salemba Teknika.
- Sutrisno. (1979). *Fisika Dasar: Gelombang dan Optik*. Bandung: penerbit ITB.
- Young, H. D., & Freedman, R.A. (2001). *Fisika Universitas Jilid 2 (Terjemahan)*. Jakarta: Erlangga.

Profil Penulis



Irnin Agustina Dwi Astuti, M.Pd

Lahir di Purbalingga dan tinggal di daerah Bekasi, Jawa Barat. Telah menempuh S1 Pendidikan Fisika Universitas Ahmad Dahlan dan S2 Magister Pendidikan Fisika Universitas Ahmad Dahlan. Pekerjaan yang pernah dilakukan yaitu menjadi guru IPA di salah satu sekolah swasta di Yogyakarta (2012-2015), dan sekarang menjadi Dosen Pendidikan Fisika di Universitas Indraprasta PGRI (2016-sekarang). Selain mengajar, aktif juga dalam kegiatan penelitian, menulis artikel, pengabdian kepada masyarakat, mengisi kegiatan di beberapa seminar dan workshop, dan mengikuti asosiasi profesi di berbagai bidang. Bidang kajian dalam penelitian yang ditekuni yaitu tentang teknologi pendidikan, pendidikan fisika, dan eksperimen fisika berbasis teknologi. Penulis pernah mendapatkan hibah penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat DRTPM dari tahun 2017 – sekarang. Karya-karya buku yang sudah pernah dibuat antara lain Panduan *Pocket Mobile Learning* Berbasis Android (2017); Manajemen Laboratorium Fisika (2019), Tantangan Pembelajaran *Online* Era Covid-19 (2020); Teori, Konsep, dan Praktek Flipped Classroom (2020); Manajemen Sumber Daya Manusia pendidikan (MSDM pendidikan) (2020), Dinamika Pendidikan dan Pembelajaran Masa Pandemi (2021), Pendidikan Sebagai Pembentuk Masa Depan Dunia (2021), Buku Evaluasi Pembelajaran dalam Pendidikan (2022), dan Pengembangan Media Pembelajaran : Telaah Perspektif Pada Era Society 5.0 (2022). Saat ini juga aktif mengelola beberapa Jurnal Nasional sebagai Editor in Chief, Editor, dan Reviewer.

Email: irnin.agustina@gmail.com

Ayu Candra Dewi Wesnawati
Green School Bali

Cermin

Cermin adalah benda dengan permukaan licin yang dapat menciptakan pantulan bayangan benda dengan sempurna. Menurut Sabine (2001), cermin awalnya dibuat dari kepingan batu mengkilap obsidian (batu kaca alami yang berasal dari aktivitas vulkanik). Namun seiring dengan perkembangan ilmu sains dan teknologi, cermin modern saat ini terdiri atas lapisan tipis aluminium disalut dengan kepingan kaca (sepuh belakang) yang bisa memantulkan 80% dari cahaya yang datang. Ada juga piranti optik yang menggunakan cermin sepuh depan seperti yang terdapat pada teleskop yang mampu memantulkan 90% dari cahaya datang. Berdasarkan bentuk permukaannya, cermin dibedakan menjadi dua yaitu cermin datar dan cermin lengkung.

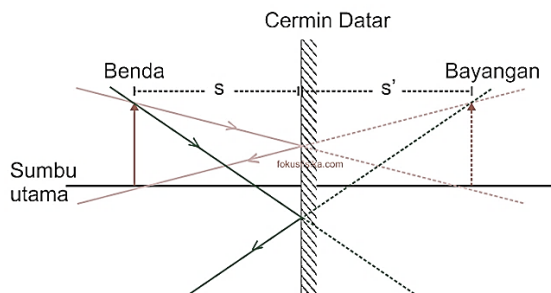
Pemantulan oleh Cermin Datar

Cermin datar adalah cermin yang permukaannya datar. Karakteristik cermin datar diantaranya 1) jarak bayangan ke cermin sama dengan jarak benda ke cermin, 2) tinggi bayangan yang dihasilkan sama dengan tinggi benda, dan 3) sifat bayangan yang dihasilkan adalah maya, tegak, dan sama besar. Pelukisan bayangan pada cermin datar, diuraikan melalui langkah-langkah berikut.

- a. Sinar pertama dilukis dari benda menuju cermin dan dipantulkan ke mata. Sesuai hukum pemantulan cahaya yaitu sudut sinar datang sama dengan sudut sinar pantul.
- b. Sinar kedua juga sama, dilukis dari benda menuju cermin dan dipantulkan ke mata.

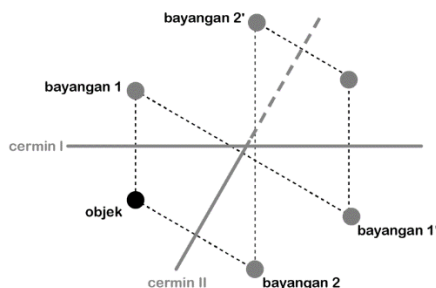
- c. Perpanjangan sinar-sinar pantul dibelakang cermin sehingga berpotongan. Perpotongan sinar pantul merupakan bayangan benda.
- d. Jarak benda (s) terhadap cermin sama dengan jarak benda terhadap bayangan (s').

Bayangan pada cermin datar bersifat maya karena titik potong berkas sinar-sinar pantulnya merupakan hasil perpanjangan sinar-sinar pantul yang divergen (menyebar). Titik bayangan dihasilkan dari perpotongan sinar-sinar pantul yang digambarkan oleh garis putus-putus



Gambar 16.1 Pembentukan Bayangan pada Cermin Datar
(Sumber: fokusfisika.com)

Apabila terdapat dua cermin datar, proses pembentukan bayangan dapat terjadi seperti gambar berikut.



Gambar 16.2 Pembentukan Bayangan pada Dua Cermin Datar
(Sumber: zenius.net)

Banyaknya bayangan benda yang terbentuk oleh dua buah cermin datar yang membentuk sudut θ dapat diketahui menggunakan rumus berikut.

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1$$

Keterangan:

θ = sudut yang dibentuk oleh dua cermin

n = banyaknya bayangan yang terbentuk

Pencermian oleh Cermin Lengkung

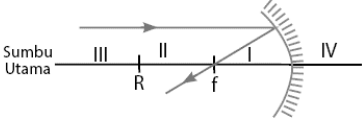
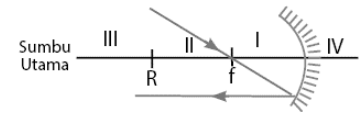
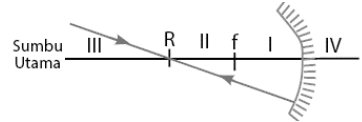
Cermin lengkung adalah cermin yang permukaannya melengkung. Cermin lengkung ada dua jenisnya yaitu cermin cekung dan cermin cembung. Cermin cekung adalah cermin yang berbentuk dari suatu bola dengan lapisan dalam yang berfungsi sebagai cermin atau memiliki permukaan cekung. Karakteristik cermin cekung adalah bersifat konvergen (mengumpulkan cahaya), fokusnya bernilai positif, sifat bayangan tergantung letak benda, dan ruang letak benda ditambah dengan ruang letak bayangan hasilnya selalu sama dengan 5. Contohnya, jika benda berada diruang I maka bayangan akan muncul di ruang IV. Pembagian ruang pada cermin cekung yaitu ruang I berada antara cermin dan titik fokus, ruang II berada antara titik fokus dan titik pusat kelengkungan cermin, ruang III berada di depan titik kelengkungan cermin sampai titik tak berhingga, dan ruang IV berada di belakang cermin cekung (di dalam cermin cekung).

Penentuan sifat bayangan pada cermin cekung menggunakan Dalil Esbach yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Sifat nyata atau maya, dapat dilihat dari letak bayangannya. Jika bayangan terletak di depan cermin cekung (ruang I, II, dan III), maka bayangan yang terbentuk bersifat nyata. Namun, jika bayangan berada di dalam cermin cekung (ruang IV), maka bayangan bersifat maya.
2. Sifat bayangan tegak atau terbalik, juga dapat dilihat dari letak bayangan. Jika benda atau bayangan berada di ruang I atau IV, maka sifatnya tegak. Namun, jika benda atau bayangan berada di ruang 2 atau 3 maka sifatnya terbalik.
3. Sifat bayangan diperbesar atau diperkecil, dilakukan dengan cara membandingkan antara ruang benda dan ruang bayangan. Apabila ruang bayangan lebih kecil dari ruang benda, maka sifatnya diperkecil, begitupun sebaliknya.

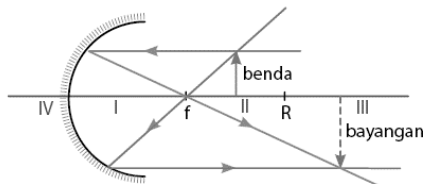
Pembentukan bayangan dapat melalui sinar-sinar istimewa pada cermin cekung yang dimuat pada tabel berikut.

Tabel 16.1 Sinar-sinar Istimewa pada Cermin Cekung

No.	Sinar istimewa	Diagram sinar
1.	Sinar datang sejajar sumbu utama kemudian dipantulkan melalui titik fokus.	
2.	Sinar datang melalui titik fokus dipantulkan sejajar dengan sumbu utama.	
3.	Sinar datang melalui titik kelengkungan kemudian dipantulkan lagi.	

(Sumber gambar: idschool.net)

Contohnya, sebuah benda terletak di ruang II antara fokus dan pusat kelengkungan cermin. Jalannya sinar membentuk bayangan yang terjadi adalah seperti gambar berikut.



Gambar 16.3 Contoh Pembentukan Bayangan pada Cermin Cekung
(Sumber: idschool.net)

Rumus menghitung jarak fokus pada cermin cekung pada cermin cekung.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Keterangan:

f = jarak fokus cermin cekung (cm)

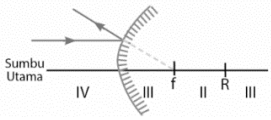
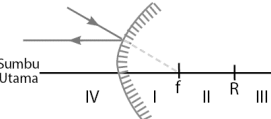
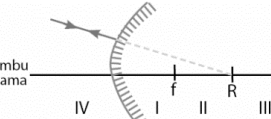
s = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

s' = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

Cermin cekung terdapat pada benda-benda seperti mikroskop, teleskop bintang, penerima sinyal pada antenna parabola, senter genggam, cermin gigi, dan lampu senter mobil.

Cermin cembung adalah cermin yang berbentuk dari suatu bola dengan lapisan luar yang berfungsi sebagai cermin atau memiliki permukaan cembung. Cermin cembung bersifat divergen (menyebarkan cahaya) dan fokusnya bernilai negatif. Umumnya benda terletak pada ruang empat dan bayangan terletak pada ruang satu sehingga sifat bayangan benda yang terbentuk adalah maya, tegak, dan diperkecil. Pembagian ruang pada cermin cembung yaitu antara cermin dan titik fokus merupakan ruang I, ruang antara titik fokus dan titik pusat kelengkungan cermin adalah ruang II, ruang III berada di belakang titik kelengkungan cermin sampai titik tak berhingga, dan ruang IV berada di depan cermin cembung. Penentuan sifat bayangan pada cermin cembung juga menggunakan Dalil Esbach. Pembentukan bayangan dapat melalui sinar-sinar istimewa pada cermin cembung yang dimuat pada tabel berikut.

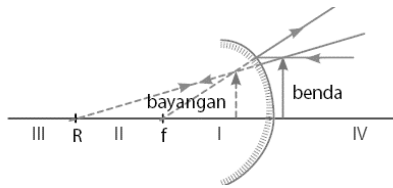
Tabel 16.2 Sinar-sinar Istimewa pada Cermin Cembung

No.	Sinar Istimewa	Diagram Sinar
1.	Sinar datang sejajar sumbu utama akan dipantulkan seolah-olah dari fokus	
2.	Sinar datang seolah-olah menuju fokus akan dipantulkan sejajar sumbu utama	
3.	Sinar datang seolah-olah menuju titik kelengkungan R akan dipantulkan seolah-	

No.	Sinar Istimewa	Diagram Sinar
	olah dari titik kelengkungan R	

(Sumber gambar: idschool.net)

Contohnya, sebuah benda diletakkan di depan cermin cembung, jalannya sinar dapat dilihat pada langkah-langkah berikut.



Gambar 16.4 Contoh Pembentukan Bayangan pada Cermin Cembung
(Sumber: idschool.net)

Letak bayangan pada cermin cembung dimanapun letak bendanya akan selalu maya, tegak, dan diperkecil. Rumus menghitung jarak fokus pada cermin cembung.

$$\frac{1}{-f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Keterangan:

f = jarak fokus cermin cekung (cm)

s = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

s' = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

Cermin sembung bisa ditemukan pada kaca spion, kaca pembesar, CCTV, cermin di tikungan tajam di jalan, kacamata hitam, lensa kamera, dan lampu penerangan jalan. Pembesaran bayangan (M) pada cermin cekung dan cermin cembung.

$$M = \frac{s'}{s} + \frac{h'}{h}$$

Keterangan:

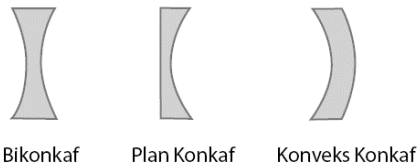
f = jarak fokus cermin (cm)

s = jarak bayangan terhadap cermin (cm)

s' = jarak bayangan terhadap cermin (cm)

Lensa

Lensa adalah benda bening yang memiliki fungsi membiaskan cahaya dan permukaannya berbentuk cekung, cembung dan datar. Lensa cekung dibagi menjadi tiga yaitu lensa cekung ganda (bikonkaf), lensa cekung datar (plankonkaf), dan lensa cekung meniscus (konvekskonkaf). Lensa cekung memiliki permukaan yang melengkung ke dalam pada kedua sisinya dan bagian tengah lensa lebih tipis daripada bagian luarnya (Jones *et al*, 2017). Lensa cekung biasanya digunakan pada teropong sebagai lensa pembalik dan pada kacamata para penderita rabun jauh (miopi).

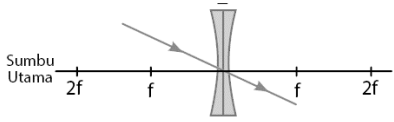


Gambar 16.5 Jenis-jenis Lensa Cekung
(Sumber gambar: idschool.net)

Karakteristik lensa cekung adalah menyebarkan cahaya (divergen), fokusnya bernilai negatif, dan sifat bayangan yang selalu maya, tegak, dan diperkecil. Pembentukan bayangan pada lensa cekung dapat melalui sinar istimewa yang dimuat pada tabel berikut.

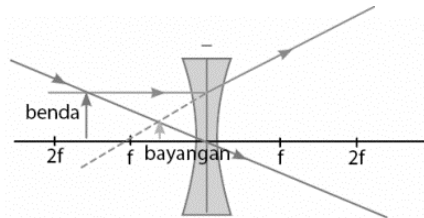
Tabel 16.3 Sinar-sinar Istimewa pada Lensa Cekung

No.	Sinar Istimewa	Diagram Sinar
1.	Sinar datang sejajar sumbu utama dibelokkan seolah-olah datang dari titik fokus.	
2.	Sinar datang melewati titik fokus dibelokkan.	

No.	Sinar Istimewa	Diagram Sinar
	sejajar sumbu utama.	
3.	Sinar datang melewati titik pusat lensa dan diteruskan	

(Sumber gambar: idschool.net)

Contohnya, sebuah benda diletakkan di antara f dan $2f$ di depan lensa cekung. Pembentukan bayangan akan berbentuk seperti berikut.



Gambar 16.6 Contoh Pembentukan Bayangan pada Lensa Cekung
(Sumber gambar: idschool.net)

Sesuai dengan sifat bayangan, lensa cekung selalu maya, tegak, dan diperkecil. Penentuan sifat bayangan pada lensa cekung menerapkan Dalil Esbach. Rumus jarak fokus pada lensa cekung dapat diperoleh melalui persamaan berikut.

$$\frac{1}{-f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Keterangan:

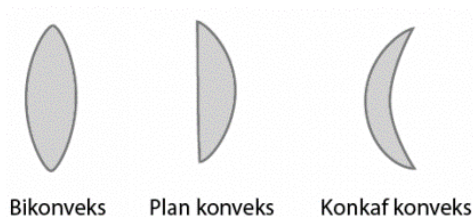
f = jarak fokus cermin cekung (cm)

s = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

s' = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

Lensa cembung memiliki bentuk lengkung rata ke bagian luar dengan bagian tengah yang lebih tebal dari bagian sisinya (Jones *et al*, 2017).

Sifat lensa cembung yaitu mengumpulkan cahaya (konvergen), fokusnya bernilai positif, dan sifat bayangan tergantung letak benda. Lensa cembung biasanya ditemukan di kaca pembesar atau lup, teropong sebagai lensa objektif dan okuler, dan pada kacamata para penderita rabun dekat (hipermetropi). Lensa cembung dibagi menjadi tiga yaitu bikonveks, plan konveks, dan konkaf konveks.

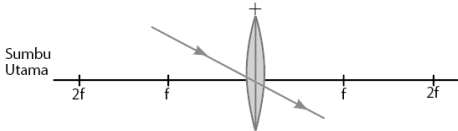


Gambar 16.7 Jenis-jenis Lensa Cembung
(Sumber gambar: idschool.net)

Pembentukan bayangan pada lensa cembung dapat melalui sinar istimewa yang dimuat pada tabel berikut.

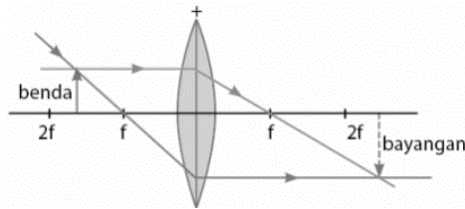
Tabel 16.4 Sinar-sinar Istimewa pada Lensa Cembung

No.	Sinar Istimewa	Diagram Sinar
1.	Sinar datang sejajar sumbu utama akan dibelokkan menuju titik fokus.	<p>The diagram shows a horizontal principal axis labeled 'Sumbu Utama' with focal points f and $2f$ marked on both sides of the lens. A vertical line with a '+' sign represents the lens. A horizontal ray with an arrow pointing right is parallel to the axis. After passing through the lens, the ray bends inward and passes through the focal point f on the right side.</p>
2.	Sinar datang melalui titik fokus akan dibelokkan sejajar dengan sumbu utama.	<p>The diagram shows a horizontal principal axis labeled 'Sumbu Utama' with focal points f and $2f$ marked on both sides of the lens. A vertical line with a '+' sign represents the lens. A ray with an arrow pointing right passes through the focal point f on the left side of the lens. After passing through the lens, the ray bends outward and becomes parallel to the principal axis.</p>

3.	Sinar datang melewati titik pusat lensa akan diteruskan.	
----	--	---

(Sumber gambar: idschool.net)

Contohnya, sebuah benda diletakkan diantara f dan $2f$ di depan lensa cembung. Pembentukan bayangan akan terjadi seperti gamabr berikut.



Gambar 16.8 Contoh Pembentukan Bayangan pada Lensa Cembung
(Sumber gambar: idschool.net)

Pada contoh ini bayangan memiliki sifat nyata, terbalik, dan diperbesar. Penentuan sifat bayangan pada lensa cembung menerapkan Dalil Esbach. Rumus jarak fokus pada lensa cembung dapat diperoleh melalui persamaan berikut.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Keterangan:

f = jarak fokus cermin cekung (cm)

s = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

s' = jarak bayangan terhadap cermin cekung (cm)

Fokus lensa baik cekung maupun cembung dipengaruhi oleh jari-jari kelengkungan, perbandingan indeks bias lensa, serta medium lensa. Ketebalan lensa akan semakin menipis ketika fokus lensa semakin besar, begitupun sebaliknya. Rumus fokus lensa dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_L}{n_m} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} \right)$$

n_L = indeks bias lensa

n_m = indeks bias medium

f = jarak fokus lensa (cm)

R = jari-jari kelengkungan lensa (cm) (+) untuk lensa cembung dan (-) untuk lensa cekung

Rumus perbesaran bayangan (M) pada lensa cembung dan lensa cekung.

$$M = \frac{s'}{s} + \frac{h'}{h}$$

Keterangan:

f = jarak fokus cermin (cm)

s = jarak bayangan terhadap cermin (cm)

s' = jarak bayangan terhadap cermin (cm) (+) untuk lensa cembung dan (-) untuk lensa cekung

Rumus untuk mengetahui kekuatan lensa (P) pada lensa cembung dan lensa cekung sebagai berikut.

$$P = \frac{100}{f}$$

Keterangan:

P = kekuatan lensa (D atau dioptri)

f = jarak fokus lensa (cm) (+) untuk lensa cembung dan (-) untuk lensa cekung

Pembiasan Cahaya

Pembiasan cahaya adalah peristiwa ketika sebuah cahaya terlihat berbelok ketika melewati sebuah medium ke medium yang berbeda kerapatan optik akibat terjadinya percepatan. Kerapatan optik artinya sifat yang dimiliki oleh medium tembus cahaya. Terdapat dua jenis pembiasan cahaya. Pertama, pembiasan yang mendekati garis normal. Artinya, kondisi saat cahaya datang dari medium renggang atau kurang rapat menuju ke medium yang lebih rapat kemudian cahaya pun dibiarkan mendekati garis normal. Contohnya yaitu cahaya dari udara menuju ke air. Kedua, pembiasan yang menjauhi garis normal. Artinya,

kondisi saat cahaya datang dari medium rapat ke medium yang renggang kemudian cahaya pun dibiaskan menjauhi garis normal. Contohnya yaitu cahaya dari air menuju udara. Hubungan antara sudut datang dengan sudut bias yang ada pada cahaya ketika melalui dua medium yang memiliki perbedaan kerapatan optik tertuang pada rumus dari Hukum Snellius berikut ini.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Keterangan:

n_1 = indeks bias medium asal sinar

n_2 = indeks bias medium sinar menuju

θ_1 = sudut sinar datang

θ_2 = sudut sinar bias

Contoh akibat adanya pembiasan cahaya yaitu sedotan yang terlihat bengkok saat berada di gelas yang berisi air, dasar kolam atau sungai yang dalam terlihat dangkal, berlian yang berkilau, cahaya senter tampak berbelok atau patah ketika diarahkan ke air jernih di malam hari, adanya pelangi, dan fatamorgana.

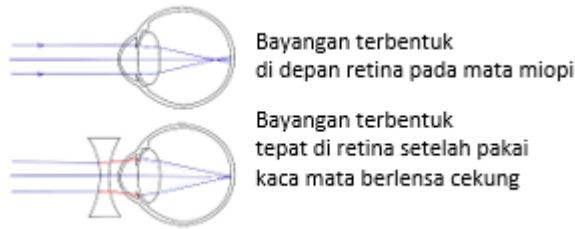
Alat Optik

Alat optik adalah alat-alat yang menggunakan lensa atau cermin untuk memanfaatkan sifat cahaya yang dapat dipantulkan dan dibiaskan yang kemudian digunakan untuk melihat. Terdapat beberapa jenis-jenis alat optik diantaranya kaca mata, lup, mikroskop, dan teropong.

Kaca Mata

Kaca mata adalah alat optik yang berfungsi untuk membantu penderita cacat mata seperti rabun jauh dan rabun dekat. Kaca mata berfungsi membantu mata yang cacat agar berfungsi selayaknya mata normal. Jenis cacat mata yang dapat ditolong menggunakan kaca mata.

1. Rabun jauh (miopi) adalah cacat mata yang penderitanya tidak bisa melihat benda yang berada pada jarak jauh dengan jelas. Miopi terjadi akibat lensa yang terlalu cembung sehingga bayangan mata jatuh di depan retina. Penderita miopi dapat ditolong menggunakan kaca mata berlensa cekung.



Gambar 16.9 Pembentukan Bayangan pada Penderita Miopi Sebelum dan Setelah Menggunakan Kaca Mata Berlensa Cekung
(Sumber gambar: wikipedia.org)

Kekuatan daya lensa cekung pada kaca mata tersebut bisa diketahui menggunakan rumus berikut.

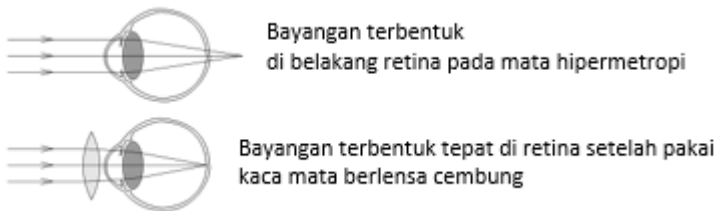
$$P_M = - \frac{100}{PR}$$

Keterangan:

P_M = daya lensa untuk miopi (dioptri atau D)

PR (Punctum Remotum) = titik jauh mata (cm)

2. Rabun dekat (hipermetropi) adalah cacat mata yang penderitanya tidak bisa melihat benda yang berada pada jarak dekat dengan jelas. Hipermetropi terjadi akibat lensa yang terlalu sekung sehingga bayangan mata jatuh di belakang retina. Penderita hipermetropi dapat ditolong menggunakan kaca mata berlensa cembung.



Gambar 16.10 Pembentukan Bayangan pada Penderita Hipermetropi Sebelum dan Setelah Menggunakan Kaca Mata Berlensa Cembung
(Sumber gambar: wikipedia.org)

Kekuatan daya lensa cembung yang diperlukan, dapat diketahui menggunakan rumus berikut.

$$P_H = \frac{100}{s} - \frac{100}{PP}$$

Keterangan:

P_H = daya lensa untuk hipermetropi (dioptri atau D)

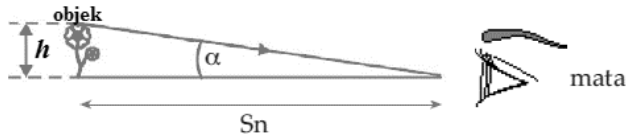
PP (Punctum Proximum) = titik dekat mata (cm)

s = jarak benda di depan kaca mata (cm)

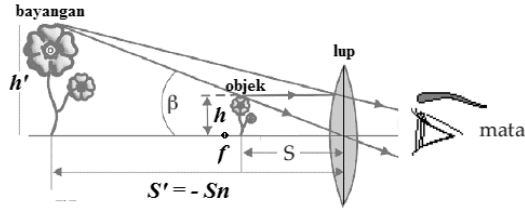
3. Presbiopi atau mata tua merupakan kondisi kelainan pada mata yang diakibatkan oleh menurunnya kemampuan mata secara berangsur untuk dapat melihat suatu objek jarak dekat dengan fokus. Penderita presbiopi dapat ditolong menggunakan kaca mata berlensa rangkap (cembung-cekung).
4. Astigmatisme atau silinder adalah sebuah gangguan pada mata karena penyimpangan dalam pembentukan bayangan pada lensa. Penderita astigmatisme dapat ditolong menggunakan kaca mata dengan lensa silindris.

Lup

Lup atau kaca pembesar adalah lensa cembung yang digunakan untuk mengamati benda-benda kecil agar terlihat lebih jelas. Bayangan yang dihasilkan lup akan bersifat maya, tegak, dan diperbesar. Saat benda diletakkan kurang dari fokus lup $S_0 < f$, mata akan mengalami akomodasi maksimum. Agar mata berakomodasi maksimum, bayangan yang terbentuk harus tepat di titik depan mata ($S' = Sn$). Ketika menggunakan lup dengan mata tak berakomodasi, benda yang diamati harus diletakkan di titik fokus ($s = f$).



Gambar 16.11 Pembentukan Bayangan tanpa Menggunakan Lup
(Sumber: mafia.mafiaol.com)



Gambar 16.12 Pembentukan Bayangan Menggunakan Lup
(Sumber: mafia.mafiaol.com)

Perbesaran sudut (anguler) lup mata berakomodasi maksimum dapat dinyatakan dengan menggunakan rumus berikut.

$$M = \left(\frac{Sn}{f} \right) + 1 - 1$$

Keterangan:

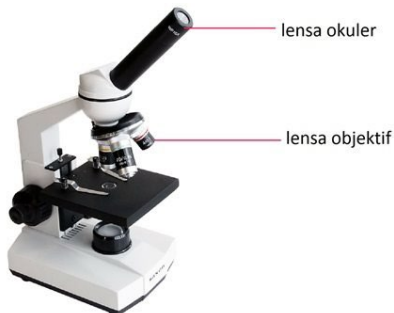
M = pembesaran lup

S_n = titik dekat mata normal (25 cm)

f = jarak fokus (cm)

Mikroskop

Mikroskop merupakan alat optik yang digunakan untuk melihat objek-objek yang sangat kecil yang tidak dapat dilihat dengan mata (Kemendikbud, 2020). Mikroskop terdiri atas dua lensa cembung yaitu lensa okuler dan lensa objektif. Cara kerja mikroskop berawal dari cahaya yang mengenai objek kemudian diteruskan oleh lensa objektif, selanjutnya sinar diteruskan oleh lensa objektif ke lensa okuler lalu ditangkap oleh mata.



Gambar 16.13 Mikroskop
(Sumber: studiobelajar.com)

Perbesaran untuk lensa objektif dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

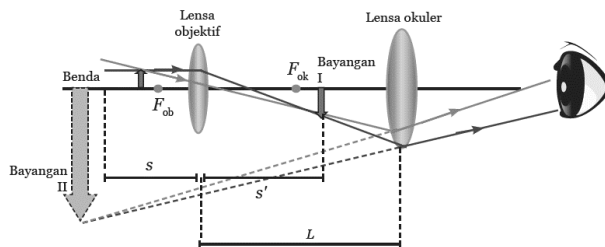
$$M_{ob} = \frac{s'_{ob}}{s_{ob}}$$

Keterangan:

M_{ob} = perbesaran lensa objektif

s_{ob} = parak benda ke lensa objektif (cm)

s'_{ob} = jarak bayangan ke lensa objektif (cm)



Gambar 16.14 Pembentukan Bayangan pada Mikroskop
(Sumber: kemdikbud, 2017)

Perbesaran untuk lensa okuler terdiri atas dua yaitu untuk mata berakomodasi maksimum dan mata tak berakomodasi maksimum. Mata berakomodasi maksimum artinya cara memandang objek yang mana otot siliar bekerja maksimum untuk menekan lensa agar berbentuk secembung-cembungnya. Masing-masing perbesarannya dapat diperoleh menggunakan rumus berikut.

$$M_{ok} = \frac{s_n}{f_{ok}} + 1$$

Keterangan:

M_{ok} = perbesaran lensa okuler

s_n = titik dekat mata normal (25 cm)

f_{ok} = jarak fokus lensa okuler (cm)

dan

$$M_{ok} = \frac{s_n}{f_{ok}}$$

Keterangan:

M_{ok} = perbesaran lensa okuler

S_n = titik dekat mata normal (25 cm)

f_{ok} = jarak fokus lensa okuler (cm)

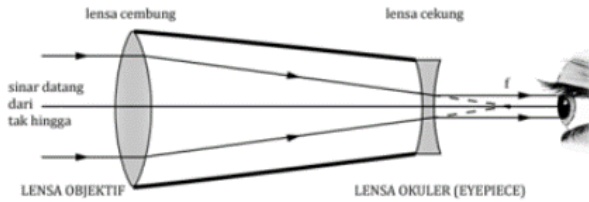
Teropong

Teropong merupakan alat optik yang digunakan untuk mengamati benda-benda yang jaraknya jauh dari pengamat sehingga tampak lebih dekat dan lebih jelas (Kemendikbud, 2020). Cara kerja teropong yaitu teropong mengumpulkan radiasi elektromagnetik yang nantinya akan membentuk citra dari objek yang sedang diamati. Teropong terdiri atas lensa objektif dan okuler. Jarak fokus objektif bersifat besar. Bayangan dari hasil pengamatan lensa objektif akan selalu jatuh pada titik fokus lensa objektif. Teropong ada beberapa jenisnya,

1. Teropong Galileo yang merupakan pengembangan teropong rancangan Lippershey yang mulanya perbesaran hanya 3 kali, menjadi 8 kali dan 20 kali (Heilbron, 2010). Teropong ini berhasil menangkap citra objek empat bulan yang ada di Jupiter dan cincin Saturnus. Teropong ini memiliki dua lensa, lensa objektif (lensa cembung) dan lensa okuler (lensa cekung). Cara kerjanya apabila pengamatan dilakukan oleh mata yang berakomodasi maksimum, maka bayangan objek akan terletak di antara lensa okuler dan titik api. Bayangan yang dihasilkan bersifat maya, tegak, dan diperbesar. Apabila pengamatan dilakukan oleh mata yang tidak berakomodasi, maka bayangan objek yang terbentuk di lensa objektif akan terletak di lensa okuler.



Gambar 16.15 Teropong Galileo
(Sumber: european space agency)

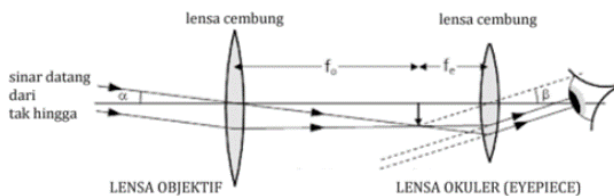


Gambar 16.16 Pembentukan Bayangan Menggunakan Teropong Galileo
(Sumber: zenius.net)

2. Teropong bintang ada banyak jenisnya yang namanya diambil dari nama pembuatnya seperti teropong bintang Newtonian dibuat oleh Issac Newton tahun 1668. Teropong bintang terdiri atas dua lensa cembung. Bayangan yang dihasilkan oleh lensa okuler pada teropong bintang bersifat maya, terbalik, dan diperbesar. Pengamatan pada teropong ini dilakukan oleh mata yang tidak berakomodasi maksimum karena objek berada di tak hingga. Bayangan yang terbentuk akan jatuh tepat di fokus lensa objektif. Jarak bayangan yang dihasilkan oleh lensa objektif ke lensa okuler akan sama dengan jarak fokus lensa okulernya. Jarak objek pada lensa okuler akan sama dengan jarak objek dari lensa okuler.



Gambar 16.17 Teropong Bintang
(Sumber: fisikazone.com)



Gambar 16.18 Pembentukan Bayangan pada Teropong Bintang
(Sumber: zenius.net)

Panjang teropong bintang dicari menggunakan rumus berikut.

$$L = f_{ob} + f_{ok}$$

Keterangan:

L = panjang teropong bintang

f_{ob} = fokus lensa objektif

f_{ok} = fokus lensa okuler

Perbesaran teropong bintang dapat dicari menggunakan rumus berikut.

$$M = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

Keterangan:

M = perbesaran teropong bintang

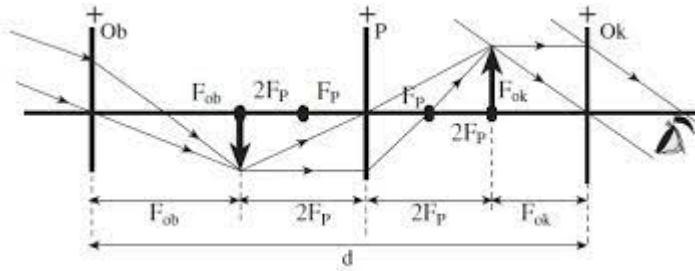
f_{ob} = fokus lensa objektif

f_{ok} = fokus lensa okuler

3. Teropong bumi (teropong yojana) merupakan teropong yang digunakan untuk mengamati benda-benda di permukaan bumi. Teropong bumi menggunakan tiga lensa cembung yaitu lensa okuler, lensa pembalik, dan lensa objektif. Bayangan yang dihasilkan akan bersifat maya, tegak, dan diperbesar.



Gambar 16.19 Teropong Bumi
(Sumber: zenius.net)



Gambar 16.20 Pembentukan Bayangan pada Teropong Bumi
(Sumber: fisikazone.com)

Panjang teropong bumi dapat dicari menggunakan rumus berikut.

$$L = f_{ob} + f_{ok} + 4f_p$$

Keterangan:

L = panjang teropong bumi

f_{ob} = fokus lensa objektif

f_{ok} = fokus lensa okuler

f_p = fokus lensa pembalik

Pembesaran teropong bumi dapat dicari menggunakan rumus berikut.

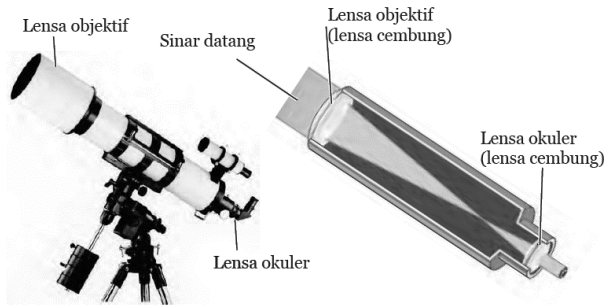
$$M = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

M = panjang teropong bumi

f_{ob} = fokus lensa objektif

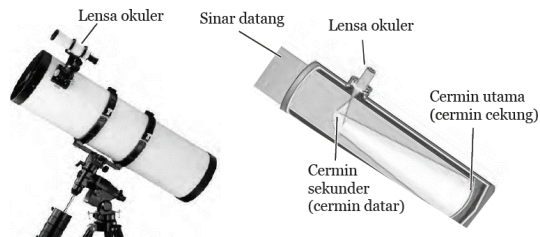
f_{ok} = fokus lensa okuler

4. Teropong bias merupakan kombinasi antara dua lensa cembung yang terletak pada bagian pipa. Lensa yang besar adalah lensa objektif sedangkan lensa yang kecil adalah lensa okuler. Lensa objektif dirancang dengan diameter yang lebih besar bertujuan agar lebih banyak cahaya yang masuk ke mata, sehingga bayangan yang terbentuk oleh lensa objektif lebih jelas dibandingkan dengan bayangan yang dibentuk oleh mata. Lensa objektif membentuk sebuah bayangan yang kemudian diperbesar oleh lensa okuler.



Gambar 16.21 Teropong Bias
(Sumber: kemdikbud, 2017)

5. Teropong pantul merupakan teropong yang lensa objektifnya diganti dengan cermin cekung. Bayangan dari sebuah objek yang letaknya jauh terbentuk di dalam tabung teleskop ketika cahaya dipantulkan dari cermin cekung. Cahaya yang dipantulkan dari cermin cekung ke cermin datar yang ada di dalam tabung. Cermin datar kemudian memantulkan cahaya ke lensa okuler.



Gambar 16.22 Teropong Pantul
(Sumber: kemdikbud, 2017)

Daftar Pustaka

- Giancoli, D. C. (2013). *Physics principles with applications*. New York: Pearson Prentice Hall.
- Heilbron, J. L. (2010). *Galileo*. Oxford University Press.
- Jones, M., Harwood, R., Lodge, L., and Sang, D. (2017). *Cambridge IGCSE Combined and Co-Ordinated Science*. UK: Cambridge University Press
- Kemendikbud. (2020). *Modul Pembelajaran SMA Fisika XI*. Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan.
- Sabine, M.B. (2001). *The Mirror: A History*. Routledge

Profil Penulis



Ayu Candra Dewi Wesnawati, S.Pd., M.Pd.

Ketertarikan penulis terhadap pendidikan sudah sedari kecil. Penulis meyakini bahwa apa yang diperoleh dari pendidikan seyogyanya lahir dan tumbuh untuk memberi manfaat bagi sekitar. Penulis menyelesaikan pendidikan Strata 1 Jurusan Pendidikan Fisika di Universitas Pendidikan Ganesha pada tahun 2017. Kemudian penulis melanjutkan ke Strata 2 Program Studi Pendidikan IPA Pasca Sarjana di Universitas Pendidikan Ganesha tahun 2019. Saat penulis memiliki waktu luang disela-sela pendidikan dan bekerja, ia mengikuti *workshop* dan seminar baik nasional maupun internasional. Selama pendidikan pula, penulis mengasah diri dengan mengikuti berbagai kesempatan lomba seperti Duta GenRe, Duta Bahasa tingkat provinsi, dan lomba penulisan karya ilmiah. Saat ini penulis bekerja di SPK SMA Green School Bali. Mengingat berkah yang ia peroleh dari hasil tempaan pendidikan dan sebagai ucapan terima kasih, penulis ingin memberikan kontribusi lebih melalui tulisan.

Email penulis: ayucandrawesnawati@gmail.com

Rafika Sari

Universitas Bhayangkara Jakarta Raya

Interferensi Cahaya

Salah satu tujuan utama mempelajari Fisika adalah untuk memahami sifat cahaya. Tujuan ini sulit dicapai (dan belum sepenuhnya tercapai) karena cahaya itu rumit. Namun, kerumitan ini berarti bahwa cahaya menawarkan banyak peluang untuk aplikasi, dan beberapa peluang terbesar melibatkan interferensi gelombang cahaya —interferensi optik. Untuk memahami fisika dasar interferensi optik, kita harus meninggalkan kesederhanaan optik geometris (di mana kita menggambarkan cahaya sebagai sinar) dan kembali ke sifat gelombang cahaya.

Interferensi cahaya adalah perpaduan interaksi dua atau lebih gelombang cahaya yang menghasilkan suatu radiasi yang menyimpang dari jumlah masing-masing komponen radiasi gelombangnya. Agar hasil interferensinya mempunyai pola yang teratur, kedua gelombang cahaya harus koheren, yaitu memiliki frekuensi dan amplitudo yang sama dan selisih fase tetap. Young pada tahun 1802 melakukan percobaan, dimana celah sempit akan menghasilkan sumber cahaya baru yang memiliki beda fasa sama atau konstan sehingga disebut koheren, yaitu memiliki frekuensi dan amplitudo yg sama serta selisih fase tetap. Pola hasil interferensi ini dapat ditangkap pada layar, sebagai:

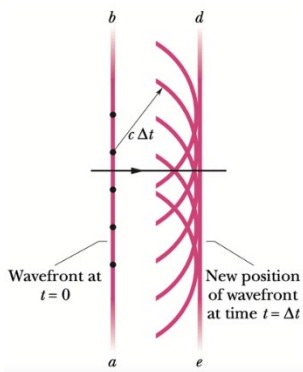
- a. Garis terang, merupakan hasil interferensi maksimum, saling memperkuat atau bersifat konstruktif,
- b. Garis gelap, merupakan hasil interferensi minimum, saling memperlemah atau bersifat destruktif

Interferensi dapat bersifat membangun dan merusak. Bersifat membangun jika beda fase kedua gelombang sama sehingga gelombang

baru yang terbentuk adalah penjumlahan dari kedua gelombang tersebut. Bersifat merusak jika beda fasenya adalah 180° , sehingga kedua gelombang saling menghilangkan. (Effendi and Pd 2013)

Prinsip Huygen

Orang pertama yang mengembangkan teori gelombang yang meyakinkan untuk cahaya adalah fisikawan Belanda Christian Huygens, pada tahun 1678. Meskipun jauh lebih tidak komprehensif daripada teori elektromagnetik Maxwell, teori Huygens lebih sederhana secara matematis dan masih berguna sampai sekarang (Hidayat, n.d.). Teori Huygens dapat menjelaskan hukum pemantulan dan pembiasan dalam bentuk gelombang dan penjelasan fisis terkait indeks pembiasan. Teori gelombang Huygens didasarkan pada konstruksi geometris yang memungkinkan kita dapat memprediksi keberadaan suatu muka gelombang tertentu jika kita mengetahui posisinya saat ini. Konstruksi ini didasarkan pada prinsip Huygens, yaitu “Semua titik pada muka gelombang berfungsi sebagai sumber titik gelombang sekunder *sferis*. Setelah waktu t , posisi baru muka gelombang akan menjadi permukaan yang bersinggungan dengan gelombang kecil sekunder ini”.



Gambar 17.1. Perambatan bidang gelombang dalam ruang hampa, sesuai prinsip Huygens (Halliday, Resnick, and Walker 2011)

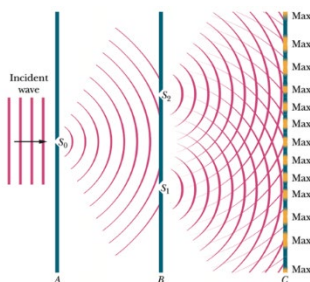
Sebagai gambaran sederhana. Gambar 17.1 diatas memperlihatkan lokasi sebuah muka gelombang dari sebuah bidang gelombang yang bergerak ke kanan dalam ruang hampa diwakili oleh bidang ab , tegak lurus terhadap arah pembaca (bidang kertas). Di manakah muka gelombang beberapa waktu kemudian? Diberikan beberapa titik pada bidang ab berfungsi sebagai sumber gelombang kecil bola sekunder yang dipancarkan pada $t = 0$. Pada waktu Δt , jari-jari semua gelombang kecil ini akan tumbuh menjadi $c \Delta t$, di mana c adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa. Selanjutnya, bidang de

bersinggungan dengan *wavelet* (gelombang kecil) ini pada waktu t . Bidang ini merepresentasikan muka gelombang dari bidang gelombang pada waktu t dan sejajar dengan bidang ab dan jarak tegak lurus terhadap c .

Eksperimen Young

Pada tahun 1801, Thomas Young secara eksperimental membuktikan bahwa cahaya adalah gelombang, bertentangan dengan apa yang dipikirkan oleh kebanyakan ilmuwan lain. Young mendemonstrasikan bahwa cahaya mengalami interferensi, seperti halnya gelombang air, gelombang suara, dan semua jenis gelombang lainnya. Selain itu, dia mampu mengukur rata-rata panjang gelombang sinar matahari, nilainya 570 nm, sangat dekat dengan nilai modern yang diterima yaitu 555 nm. Di sini kita akan mempelajari eksperimen Young sebagai contoh interferensi gelombang cahaya.

Gambar 17.2 memberikan susunan dasar percobaan Young. Cahaya dari sumber monokromatik menerangi celah S_0 di layar A . Cahaya yang muncul kemudian menyebar melalui difraksi untuk menerangi dua celah S_1 dan S_2 di layar B . Difraksi cahaya oleh dua celah ini mengirimkan gelombang melingkar yang tumpang tindih ke wilayah di luar layar B , dimana gelombang dari satu celah mengganggu gelombang dari celah yang lain. Gambar 17.2 mengilustrasikan interferensi dari gelombang yang tumpang tindih. Pada layar C , titik-titik interferensi maksimum membentuk baris-baris terang — disebut pita terang. Daerah gelap — disebut pita gelap, atau interferensi minimum — dihasilkan dari interferensi yang merusak dan terlihat di antara pasangan pita terang yang berdekatan. Pola pita terang dan gelap pada layar disebut pola interferensi. Gambar 17.2 adalah ilustrasi bagian pola interferensi yang akan terlihat oleh pengamat yang berdiri di sebelah kiri layar C dalam susunan sesuai Gambar 17.2.

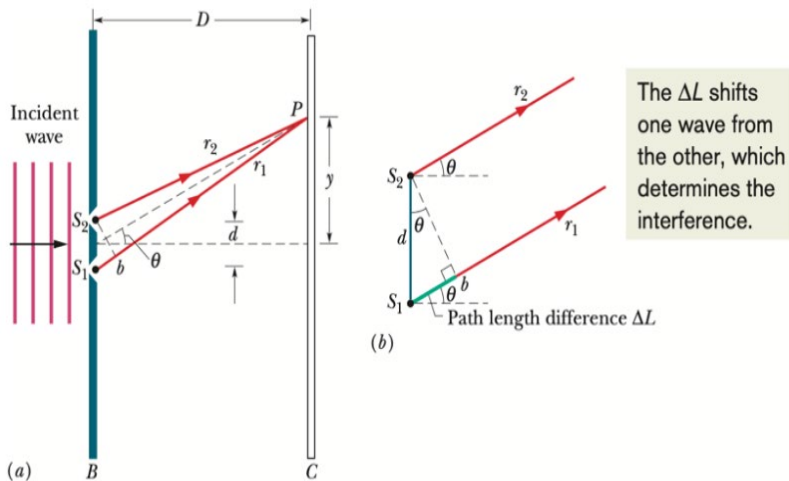


Gambar 17.2. Ilustrasi Gelombang yang muncul dari dua celah saling tumpang tindih dan membentuk pola interferensi (Halliday, Resnick, and Walker 2011)

Interferensi oleh Celah Ganda

Gelombang cahaya menghasilkan pola garis gelap-terang dalam eksperimen interferensi celah ganda Young, selanjutnya apa yang menentukan lokasi pola garis tersebut? Untuk menjawabnya, kita akan menggunakan susunan pada Gambar 17.3(a). Di sana, bidang gelombang cahaya monokromatik datang pada dua celah S_1 dan S_2 di layar B , cahaya berdifraksi melalui celah dan menghasilkan pola interferensi pada layar C . Dengan sumbu pusat dari titik tengah antara celah ke layar C sebagai referensi. Kemudian dipilih sembarang titik P pada layar dengan sudut θ terhadap sumbu pusat. Titik ini memotong gelombang sinar r_1 dari celah bawah dan gelombang sinar r_2 dari celah atas.

Bagian dari gelombang-gelombang ini berada dalam fase yang sama karena berasal dari gelombang yang sama ketika mereka melewati dua celah. Akan tetapi, begitu melewati celah, kedua gelombang harus menempuh jarak yang berbeda untuk mencapai P . Pada Gambar 17-3(b) terlihat bahwa perbedaan fase antara dua gelombang dapat berubah jika gelombang menempuh jalur dengan panjang yang berbeda.



Gambar 17.3. (a) Gelombang dari celah S_1 dan S_2 yang menyebar kemudian bergabung di P , sebuah titik sembarang pada layar C pada jarak y dari sumbu pusat. Sudut θ berfungsi sebagai penentu lokasi untuk P . (b) Untuk $D > d$, kita dapat memperkirakan sinar r_1 dan r_2 sejajar, pada sudut θ terhadap sumbu pusat (Halliday, Resnick, and Walker 2011)

Perubahan beda fasa disebabkan oleh perbedaan panjang lintasan ΔL pada lintasan yang ditempuh gelombang. Perhatikan dua gelombang pada awalnya dalam fase yang sama, berjalan di sepanjang lintasan dengan perbedaan panjang lintasan ΔL , dan kemudian melewati beberapa titik yang sama. Ketika ΔL adalah nol atau kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang, gelombang-gelombang itu akan tiba di titik yang sama dalam fase yang sama dan mereka mengalami interferensi konstruktif di titik tersebut. Jika hal tersebut terjadi pada gelombang sinar r_1 dan r_2 pada Gambar 17.3 maka titik P terbentuk pita terang. Sebaliknya, ketika ΔL adalah kelipatan ganjil dari setengah panjang gelombang, gelombang-gelombang itu tiba di titik pertemuan yang tidak sefase sehingga mengalami interferensi destruktif di titik tersebut, maka di titik P terbentuk pita gelap. Dengan demikian, apa yang muncul pada setiap titik dalam percobaan interferensi celah ganda Young ditentukan oleh perbedaan panjang lintasan ΔL dari sinar yang mencapai titik tersebut, yang dapat dirumuskan pada persamaan (17.1) dan (17.2) berikut.

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (17.1)$$

dengan ΔL harus bernilai nol atau kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang $\Delta L = d \sin \theta = m\lambda$ dengan $m = 0, 1, 2, \dots$ sehingga formulasi untuk pola terang dan pola gelap adalah sebagai berikut:

$$d \sin \theta = m\lambda \text{ (maksimum, pola terang)} \quad (17.2)$$

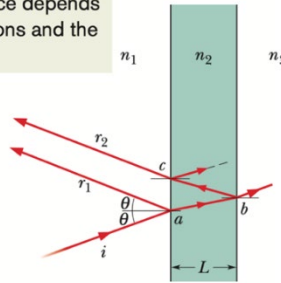
$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \text{ (minimum, pola gelap)}$$

dengan pola terang berada pada sudut $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{2\lambda}{d}\right)$ dan sudut untuk pola gelap $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{1.5\lambda}{d}\right)$.

Interferensi oleh Lapisan Tipis

Warna-warni yang kita lihat saat sinar matahari menyinari gelembung sabun atau tumpahan minyak disebabkan oleh interferensi gelombang cahaya yang dipantulkan dari permukaan depan dan belakang dari lapisan transparan tipis tersebut. Kejadian ini merupakan salah satu contoh dari peristiwa interferensi pada lapisan tipis atau disebut dengan istilah film. Ketebalan lapisan sabun atau minyak bersifat khas dari besarnya panjang gelombang cahaya (tampak) yang terlibat.

The interference depends on the reflections and the path lengths.



Gambar 17.4. Gelombang cahaya diwakili dengan sinar i menuju film tipis dengan ketebalan L dan indeks bias n_2 . Sinar r_1 dan r_2 mewakili gelombang cahaya yang telah dipantulkan oleh permukaan depan dan belakang film.

Ketiga sinar sebenarnya hampir tegak lurus terhadap film. Interferensi gelombang r_1 dan r_2 satu sama lain bergantung pada perbedaan fasanya. Indeks bias medium n_1 di sebelah kiri dapat berbeda dari indeks bias n_3 medium di sebelah kanan, tetapi untuk saat ini kita asumsikan bahwa kedua media tersebut adalah udara, dengan $n_1 = n_3 = 1.0$, yang kurang dari n_2 . (Halliday, Resnick, and Walker 2011)

Gambar 17.4 menggambarkan lapisan tipis transparan dengan ketebalan seragam L dan indeks bias n_2 , disinari oleh cahaya terang dengan panjang gelombang λ dari sumber titik yang jauh. Diasumsikan bahwa udara berada di kedua sisi film dengan demikian $n_1 = n_3$. Untuk penyederhanaan, diasumsikan juga bahwa sinar cahaya hampir tegak lurus terhadap film ($\theta \approx 0$). Cahaya datang, diwakili oleh sinar i , memotong permukaan depan (kiri) film pada titik a dan mengalami pemantulan dan pembiasan di sana. Sinar pantul r_1 ditangkap oleh mata pengamat. Cahaya yang dibiaskan melintasi film ke titik b di permukaan belakang, akan mengalami pemantulan dan pembiasan. Cahaya yang dipantulkan di b melintas kembali melalui film ke titik c , kembali mengalami pemantulan dan pembiasan. Cahaya yang dibiaskan pada c , diwakili oleh sinar r_2 , ditangkap oleh mata pengamat.

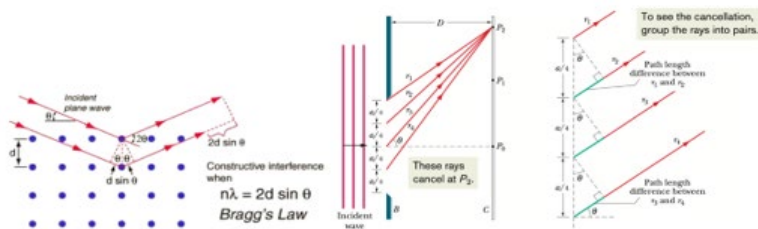
Jika gelombang cahaya dari sinar r_1 dan r_2 berada pada fase yang tepat ditangkap mata, akan menghasilkan interferensi maksimum pada daerah ac terbentuk film terang bagi pengamat. Jika mereka berbeda fase akan menghasilkan interferensi minimum dan daerah ac menjadi gelap bagi pengamat, meskipun diterangi. Jadi, kunci dari apa yang terlihat pengamat adalah perbedaan fase antara gelombang sinar r_1 dan r_2 . Kedua sinar berasal dari sinar i yang sama, tetapi lintasan yang terlibat dalam menghasilkan r_2 melibatkan cahaya yang berjalan dua kali melintasi film (a ke b , dan kemudian b ke c), sedangkan lintasan yang terlibat dalam menghasilkan r_1 tidak melibatkan perjalanan

melalui film. Bila sudut θ bernilai nol, diperkirakan perbedaan panjang lintasan antara gelombang r_1 dan r_2 sebagai $2L$. Namun, untuk menemukan perbedaan fase antara gelombang, tidak hanya dengan menemukan jumlah panjang gelombang λ yang setara dengan panjang lintasan $2L$. Pendekatan sederhana ini tidak mungkin karena dua alasan: (1) perbedaan panjang jalur terjadi di media selain udara, dan (2) keterlibatan refleksi, yang dapat mengubah fase. Perbedaan fase antara dua gelombang dapat berubah jika salah satu atau keduanya dipantulkan.

Difraksi Cahaya

Difraksi merupakan cara unggul untuk memahami apa yang terjadi pada level atomis dari suatu material kristalin. Sinar X, elektron dan neutron memiliki panjang gelombang yang sebanding dengan dimensi atomik sehingga radiasi sinar tersebut sangat cocok untuk menginvestigasi material kristalin. Teknik difraksi mengeksplorasi radiasi yang terpantul dari berbagai sumber seperti atom dan kelompok atom dalam kristal. Ada beberapa macam difraksi yang dipakai dalam studi material yaitu: difraksi sinar X, difraksi neutron dan difraksi elektron. Namun yang sekarang umum dipakai adalah difraksi sinar X dan elektron.

Dari metode difraksi kita dapat mengetahui secara langsung mengenai jarak rata – rata antar bidang atom. Kemudian kita juga dapat menentukan orientasi dari kristal tunggal. Yang secara langsung dapat mendeteksi struktur kristal dari suatu material yang belum diketahui komposisinya. Kemudian secara tidak langsung mengukur ukuran, bentuk dan internal stres dari suatu kristal. Prinsip terjadinya difraksi adalah akibat dari pantulan elastis yang terjadi ketika sebuah sinar berinteraksi dengan sebuah target. Pantulan yang terjadi tanpa kehilangan energi disebut pantulan elastis (*elastic scattering*).



Gambar 17.5. Konstruksi interferensi pada Hukum Bragg (kiri), dan Ilustrasi gelombang teratas dari empat titik dengan lebar $a/4$ mengalami interferensi destruktif di titik P_2 , untuk $D \gg a$ maka dapat diperkirakan sinar r_1, r_2, r_3, r_4 sejajar dengan sudut θ terhadap sumbu pusat (kanan). (Halliday, Resnick, and Walker 2011)

Ada dua karakteristik utama dari difraksi yaitu geometri dan intensitas. Geometri dari difraksi secara sederhana dijelaskan oleh Bragg's Law. Misalkan ada dua pantulan sinar α dan β . Secara matematis sinar β tertinggal dari sinar α sejauh $2d \sin \theta$ secara geometris. Agar dua sinar ini dalam fasa yang sama maka jarak ini harus berupa kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang sinar λ . Maka didapatkanlah Hukum Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (17.3)$$

dengan $a = 2d$. Setiap pasangan sinar pada gambar 17.5 memiliki selisih panjang lintasan yang sama $a/2 \sin \theta$. Membuat selisih panjang lintasan sama dengan $\frac{1}{2}\lambda$ (kondisi pada pita gelap pertama), akan diperoleh:

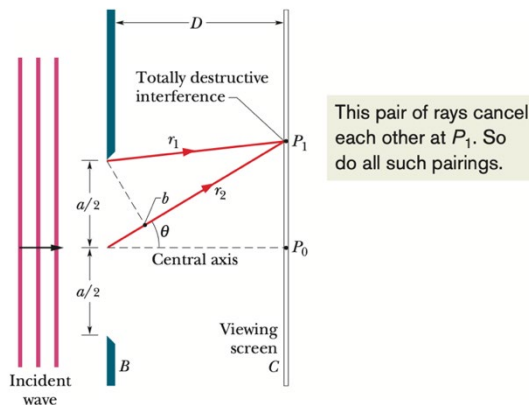
$$\begin{aligned} \frac{a}{2} \sin \theta &= \frac{\lambda}{2} \\ a \sin \theta &= \lambda \text{ (pita gelap pertama)} \end{aligned} \quad (17.4)$$

Secara matematis, difraksi hanya terjadi ketika Hukum Bragg dipenuhi. Secara fisis jika kita mengetahui panjang gelombang dari sinar yang membentur kemudian kita bisa mengontrol sudut dari benturan maka kita bisa menentukan jarak antar atom (geometri dari kisi). Persamaan ini adalah persamaan utama dalam difraksi. Secara praktis sebenarnya nilai n pada persamaan Bragg diatas nilainya 1. Sehingga cukup dengan persamaan $2d \sin \theta = \lambda$.

Difraksi Celah Tunggal

Sekarang mari kita periksa pola difraksi gelombang bidang cahaya dengan panjang gelombang λ yang didifraksikan oleh celah tunggal yang panjang dan sempit dengan lebar a dalam layar B, seperti yang ditunjukkan pada penampang melintang pada Gambar 17.6. Ketika cahaya yang dibiaskan mencapai layar C, gelombang dari berbagai titik di dalam celah mengalami interferensi dan menghasilkan pola difraksi pita terang dan gelap (interferensi maksimum dan minimum) pada layar. Untuk menemukan letak pita, dengan prosedur yang mirip dengan menemukan letak pita pada pola interferensi dua celah. Namun, difraksi lebih menantang secara matematis, dan berikut persamaan untuk pita gelap.

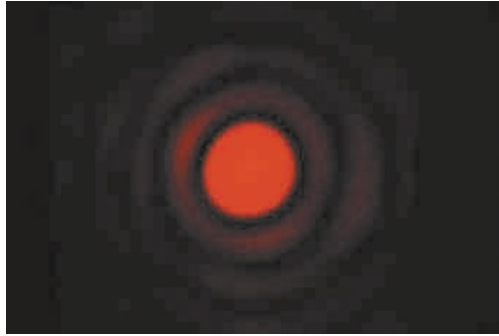
Untuk menemukan pinggiran gelap, kita akan menggunakan strategi penyederhanaan yang memasangkan semua sinar yang datang melalui celah dan kemudian menemukan kondisi yang menyebabkan gelombang kecil sinar di setiap pasangan saling meniadakan. Pada Gambar 36-4 untuk menemukan pinggiran gelap pertama di titik P_1 , pertama kita membagi celah menjadi dua zona dengan lebar yang sama $a/2$. Kemudian kita perpanjang sinar cahaya r_1 dari titik atas zona dan sinar cahaya r_2 dari titik atas dan zona bawah ke P_1 . Akan ada pasangan sinar sembarang (*wavelet*) sepanjang dua sinar ini untuk saling meniadakan satu sama lain ketika mereka tiba di P_1 . Maka pasangan sinar yang serupa dari kedua zona akan memberikan pembatalan. Sebuah sumbu pusat ditarik dari pusat celah ke layar C, dan P_1 terletak pada sudut θ terhadap sumbu tersebut.



Gambar 17.6. Gelombang dari titik puncak dua zona dengan lebar $a/2$ mengalami interferensi destruktif total di titik P_1 pada layar tampilan C. (Halliday, Resnick, and Walker 2011)

Gelombang kecil dari pasangan sinar r_1 dan r_2 yang sefasa karena mereka berasal dari muka gelombang yang sama melewati celah, sepanjang lebar celah. Namun, untuk menghasilkan pinggiran gelap pertama, mereka harus berbeda fase sebesar $1/2$ saat mencapai P_1 ; perbedaan fasa ini disebabkan oleh perbedaan panjang lintasan mereka, dengan jalur yang ditempuh oleh *wavelet* r_2 untuk mencapai P_1 lebih panjang daripada jalur yang ditempuh oleh *wavelet* r_1 . Untuk menampilkan perbedaan panjang lintasan ini, harus mencari titik b pada sinar r_2 sehingga panjang lintasan dari b ke P_1 sama dengan panjang lintasan sinar r_1 . Maka selisih panjang lintasan antara kedua sinar tersebut adalah jarak dari pusat celah ke b .

Difraksi oleh Bukaak Sirkuler



Gambar 17.7. Pola gelombang difraksi bukaan melingkar. Pola pusat maksimum adalah maksimum sekunder melingkar yang berada di tengah dan selanjutnya merupakan pola maksimum sekunder dengan intensitas yang berkurang dibandingkan dengan maksimum pusat. (Jearl Walker)

Difraksi oleh bukaan sirkuler — yaitu bukaan melingkar, seperti lensa bundar, yang dapat dilalui cahaya. Gambar 17.7 menunjukkan bayangan yang dibentuk oleh cahaya dari laser yang diarahkan ke bukaan melingkar dengan diameter sangat kecil. Gambar ini bukanlah sebuah titik tetapi sebuah piringan bundar yang dikelilingi oleh beberapa cincin sekunder yang semakin redup. Pada difraksi bukaan sirkuler, celah berbentuk lingkaran dengan diameter d , bukan celah persegi panjang. Letak minimum pertama untuk pola difraksi dari bukaan melingkar berdiameter d dirumuskan

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d} \text{ (minimum pertama – bukaan sirkular)} \quad (17.5)$$

Sudut θ adalah sudut dari sumbu pusat ke titik manapun pada lingkaran pola minimum. Bandingkan persamaan (17.5) dengan persamaan (17.4) pola minimum celah tunggal

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} \text{ (minimum pertama – celah tunggal)}$$

yang menempatkan minimum pertama untuk celah sempit yang panjang dengan lebar a . Perbedaan utamanya adalah faktor 1,22 karena bentuk bukaan yang melingkar.

Difraksi oleh Celah Ganda

Dalam eksperimen celah ganda diasumsikan bahwa celah itu jauh lebih sempit daripada panjang gelombang cahaya yang meneranginya ($a \ll \lambda$). Maka pusat maksimum dari pola difraksi dari salah satu celah menutupi keseluruhan layar tampilan. Selain itu, interferensi cahaya dari dua celah menghasilkan pita terang dengan intensitas yang kira-kira sama. Namun, dalam praktiknya dengan cahaya tampak, kondisi tersebut sering tidak terpenuhi. Untuk celah yang relatif lebar, interferensi cahaya dari dua celah menghasilkan pita terang yang tidak semuanya memiliki intensitas yang sama. Artinya, intensitas pita yang dihasilkan oleh interferensi celah ganda diubah oleh difraksi cahaya yang melewati setiap celah.

$$I(\theta) = I_m \text{ (minimum pertama – celah tunggal)} \quad (17.6)$$

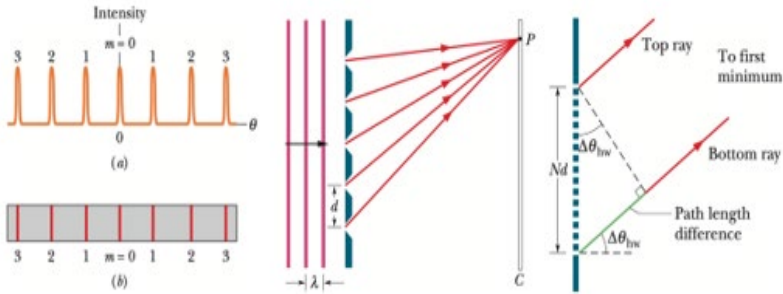
$$I(\theta) = I_m (\cos^2 \beta) \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \text{ (celah ganda)} \quad (17.7)$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad \text{dan} \quad \alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

dengan d adalah jarak antara pusat celah dan a adalah lebar celah.

Difraksi oleh Kisi

Salah satu cara yang bagus dalam mempelajari cahaya atau objek yang memancarkan dan menyerap cahaya adalah kisi difraksi. Kisi difraksi mirip dengan susunan celah ganda pada Gambar 17.3 tetapi memiliki jumlah N celah yang jauh lebih banyak, hingga ribuan celah per milimeter. Sebuah kisi yang ideal hanya terdiri dari lima celah ditunjukkan pada Gambar 36-18a. Ketika cahaya monokromatik melalui celah, akan terbentuk pola interferensi yang dapat dianalisis untuk menentukan panjang gelombang cahaya. Jika kita secara bertahap meningkatkan jumlah celah dari dua menjadi sejumlah N , nilai skema intensitas akan berubah dari celah ganda menjadi skema yang jauh lebih rumit dan akhirnya menjadi grafik sederhana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 36-18b. Pola yang terlihat pada layar untuk pita terang maksimum akan sangat sempit (berbentuk garis) yang dipisahkan oleh daerah gelap yang relatif luas.



Gambar 17.8. (kiri) Plot intensitas yang dihasilkan oleh kisi difraksi dengan banyak celah menghasilkan puncak-puncak sempit, dengan nomor urut m . Pita terang yang terlihat di layar disebut garis dan diberi label/nomor urut m ; (tengah) Kisi difraksi yang ideal terdiri dari lima celah, yang menghasilkan pola interferensi pada layar C; (kanan) Celah atas dan bawah dari N kisi difraksi dipisahkan oleh Nd memiliki beda panjang lintasan sebesar $Nd \sin \Delta\theta_{hw}$, dengan $\Delta\theta_{hw}$ adalah sudut minimum pertama. (Halliday, Resnick, and Walker 2011)

Diasumsikan bahwa layar cukup jauh dari kisi sehingga sinar yang mencapai titik tertentu P pada layar kira-kira sejajar ketika meninggalkan kisi (Gbr. 17.5 kanan). Kemudian dengan menggunakan aturan yang sama dengan interferensi celah ganda, maka d adalah jarak antar celah pada kisi. Pada interferensi minimum, sinar dari N kisi saling meniadakan. Maka pita minimum pertama terjadi jika perbedaan panjang lintasan antara sinar atas dan bawah sama dengan λ . Untuk difraksi celah tunggal perbedaan ini sebesar $\sin \theta$. Untuk kisi dengan N celah, masing-masing celah dipisahkan dengan jarak d , maka jarak antara celah atas dan bawah sebesar Nd (Gbr. 17.8 kanan), sehingga perbedaan panjang lintasan antara sinar atas dan bawah sebesar $Nd \sin \Delta\theta_{hw}$. Untuk, minimum pertama terjadi saat

$$d \sin \theta = m \lambda, \dots \text{for } m = 1, 2, 3, \dots \text{ (garis maksimum)}$$

$$Nd \sin \Delta\theta_{hw} = \lambda \tag{17.8}$$

$$\Delta\theta_{hw} = \frac{\lambda}{Nd} = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta}$$

dengan λ adalah panjang gelombang cahaya. Setiap bilangan bulat m mewakili garis yang berbeda; bilangan bulat ini dapat digunakan untuk menandai garis yang kemudian disebut nomor urut, dan garis tengah disebut garis orde nol ($m = 0$), garis orde pertama ($m = 1$), garis orde kedua ($m = 2$) dan seterusnya.

Resolving Power

Untuk kasus dengan panjang gelombang sangat berdekatan (tetapi masih dapat dibedakan) dan lebar celah kisi sangat sempit. Maka kisi harus memiliki daya pisah R yang tinggi, didefinisikan sebagai

$$R = \frac{\lambda_{avg}}{\Delta\lambda} \text{ (definisi resolving power)} \quad (17.9)$$

Dengan λ_{avg} adalah panjang gelombang rata-rata dari dua sumber gelombang yang hampir tidak dapat dikenali sebagai terpisah dan $\Delta\lambda$ adalah beda panjang gelombang di antara keduanya. Semakin besar R , semakin dekat dua sumber gelombang yang masih dapat dibedakan.

Dispersi Cahaya

Agar berguna dalam membedakan panjang gelombang yang dekat satu sama lain, kisi harus menyebarkan garis difraksi yang terkait dengan berbagai panjang gelombang. Penyebaran ini, disebut dispersi, didefinisikan sebagai

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \text{ (definisi dispersi)} \quad (17.10)$$

dengan $\Delta\theta$ adalah sudut pisah antara dua sumber gelombang yang berbeda panjang gelombangnya ($\Delta\lambda$). Semakin besar D maka semakin besar jarak antara dua sumber cahaya yang panjang gelombangnya berbeda sebesar $\Delta\lambda$. Maka untuk dispersi kisi pada sudut θ dirumuskan

$$D = \frac{m}{d \cos \theta} \text{ (dispersi kisi)} \quad (17.11)$$

Jadi, untuk mencapai dispersi yang lebih tinggi kita harus menggunakan kisi dengan jarak kisi yang lebih kecil dari d dan bekerja dalam orde m yang lebih tinggi. Perhatikan bahwa dispersi tidak bergantung pada jumlah aturan N di kisi. Satuan SI untuk D adalah derajat per meter atau radian per meter.

Polarisasi Cahaya

Polarisasi adalah suatu peristiwa perubahan arah getar gelombang pada cahaya yang acak menjadi satu arah getar. Dengan kata lain, polarisasi adalah peristiwa penyerapan arah bidang getar dari gelombang. Gejala polarisasi hanya dapat dialami oleh gelombang transversal saja, sedangkan gelombang longitudinal tidak mengalami gejala polarisasi.

Fakta bahwa cahaya dapat mengalami polarisasi menunjukkan bahwa cahaya merupakan gelombang transversal.

Pada umumnya, gelombang cahaya mempunyai banyak arah getar. Suatu gelombang yang mempunyai banyak arah getar disebut gelombang tak terpolarisasi, sedangkan gelombang yang memiliki satu arah getar disebut gelombang terpolarisasi. Gejala polarisasi dapat digambarkan dengan gelombang yang terjadi pada tali yang dilewatkan pada celah. Apabila tali digetarkan searah dengan celah maka gelombang pada tali dapat melewati celah tersebut. Sebaliknya jika tali digetarkan dengan arah tegak lurus celah maka gelombang pada tali tidak bisa melewati celah tersebut (Effendi, 2013).

Sinar alami seperti sinar Matahari pada umumnya adalah sinar yang tak terpolarisasi. Cahaya dapat mengalami polarisasi dengan berbagai cara, antara lain:

1. Polarisasi karena Pemantulan
2. Polarisasi karena Pemantulan dan Pembiasan
3. Polarisasi karena Bias Kembar (Pembiasan Ganda)
4. Polarisasi karena Absorpsi
5. Polarisasi karena Hamburan
6. Pemutaran Bidang Polarisasi

Daftar Pustaka

Effendi, and M Pd. 2013. *Diktat Mata Kuliah Optika*. Sukaraja Oku Timur: STKIP Nurul Huda Sumatera Selatan.

Halliday, David, Robert Resnick, and Jearl Walker. 2011. *Fundamentals of Physics 9th Edition*. Edited by Geraldine Osnato and Stuart Johnson. 9th ed. United State of America: John Wiley & Sons. www.wileyplus.com.

Hidayat, Arif. n.d. *Optika*. Malang: Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Malang.

Profil Penulis



Rafika Sari, S.Si., M.Si.

Latar belakang Pendidikan penulis yaitu S1 program studi Fisika FMIPA di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada tahun 2012 dengan konsentrasi keilmuan Komputasi Fisika. Pada tahun 2014, penulis melanjutkan studi S2 di program studi Sains Komputasi FMIPA Institut Teknologi Bandung (ITB).

Saat ini penulis memilih untuk mengabdikan diri sebagai Dosen di program studi Informatika Fakultas Ilmu Komputer Universitas Bhayangkara Jakarta Raya dengan aktif mengajar beberapa mata kuliah diantaranya Fisika, Aljabar Linear, Kalkulus, Metode Numerik, Statistika dan Probabilitas, Matematika Diskrit, Sistem Digital, Data Mining, Machine Learning, dst. Berbagai asosiasi profesi juga diikuti oleh penulis untuk menambah kompetensi keilmuannya, diantaranya Asosiasi Perguruan Tinggi Ilmu Komputer (APTIKOM), Masyarakat Komputasi Indonesia (MKI), Asosiasi Ilmuwan Data Indonesia (AIDI), *Indonesian Computer Electronics and Instrumentation Support Society* (INDOCEISS), *Physical Society Indonesia* (PSI), dan Relawan Jurnal Indonesia (RJI).

Ketertarikan penulis pada bidang *Data Science* dan *Artificial Intelligence* sehingga telah banyak menghasilkan karya publikasi penelitian dibidang tersebut. Beberapa penelitian yang telah dilakukan didanai oleh internal perguruan tinggi dan juga Kemdikbudristek DIKTI. Selain peneliti, penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara. Saat ini penulis juga aktif sebagai Editor in Chief pada *Journal of Computer Science Contributions* (JUCOSCO).

Email Penulis: rafika.sari@dsn.ubharajaya.ac.id

- 1 OSILASI
I Putu Tedy Indrayana
- 2 GELOMBANG BERJALAN
Minarti
- 3 GELOMBANG BUNYI
Kristina Uskenat
- 4 MUATAN DAN MEDAN LISTRIK
Gusti Ayu Rai Tirta
- 5 HUKUM GAUSS
Hebat Shidow Falah
- 6 POTENSIAL LISTRIK
Samsul Arifin
- 7 KAPASITANSI
Muh. Said L
- 8 ARUS LISTRIK DAN RESISTANSI
Jan Setiawan
- 9 RANGKAIAN LISTRIK SEARAH
Nurul Fuadi
- 10 MEDAN MAGNETIK
Ety Kurniati
- 11 GAYA MAGNETIK
Kurniati Abidin
- 12 INDUKSI ELEKTROMAGNETIK
Sudirman
- 13 RANGKAIAN LISTRIK BOLAK BALIK
Mawarni Saputri
- 14 PERSAMAAN MAXWELL DAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK
A. Jusriana
- 15 CAHAYA
Irnin Agustina Dwi Astuti
- 16 OPTIKA GEOMETRI
Ayu Candra Dewi Wesnawati
- 17 OPTIKA FISIS
Rafika Sari

Editor:

Suci Haryanti

Untuk akses **Buku Digital**,
Scan **QR CODE**



Media Sains Indonesia
Melong Asih Regency B.40, Cijerah
Kota Bandung - Jawa Barat
Email : penerbit@medsan.co.id
Website : www.medsan.co.id



ISBN 978-623-195-441-1 (PDF)



9 786231 954411